



实用功放

梅更华 编著

DIY

福建科学技术出版社



如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。



责任编辑 吴志海
封面设计 陈培亮
责任校对 张洪波

ISBN 7-5335-2090-4

9 787533 520908 >

ISBN 7-5335-2090-4/TN·272

定价：16.00 元

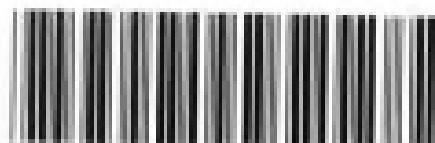
TN7
M29

实用功放

DIY

梅更华 编著

福建科学技术出版社



A1020793

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。

图书在版编目(CIP)数据

实用功放 DIY/梅更华编著. —福州:福建科学技术出版社, 2003.1

ISBN 7-5335-2090-4

I. 实… II. 梅… III. 音频设备-功率放大器-
基础知识 IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 069519 号

书 名 实用功放 DIY
编 著 梅更华
出版发行 福建科学技术出版社(福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
经 销 各地新华书店
排 版 福建科学技术出版社排版室
印 刷 福州市屏山印刷厂
开 本 880 毫米×1230 毫米 1/32
印 张 7.375
插 页 5
字 数 184 千字
版 次 2003 年 1 月第 1 版
印 次 2003 年 1 月第 1 次印刷
印 数 1—4 000
书 号 ISBN 7-5335-2090-4/TN·272
定 价 16.00 元

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

前　　言

DIY 是英文 Do It Yourself 的缩略语，即自己动手做之意。时下 DIY 这一群体日渐增多，特别是广大电子 DIY 者。对他们而言，设计、制作一些趣味实用的功能电路，是学习电子技术、提高动手实践能力的有效途径，也是学习掌握更复杂、功能更齐全的电路的基础。

为此，我们组织编写了这套面向广大电子爱好者、高职高专相关专业学生的电子制作丛书，分别介绍实用功放 DIY、实用音箱 DIY、实用电子装置 DIY、实用稳压电源 DIY。这些电路由浅入深，由简至繁，理论与实践相结合，突出实践，电路安装调试后就有一定的使用价值。各电路所采用的电子元器件在市面均能购到。读者可以根据自己的实际情况，选择合适的电路进行制作，并在制作中更深入地学习无线电知识，加深对元器件属性的认识，提高动手实践能力。

本书为实用功放 DIY 分册，共四章。第一章简要介绍功率放大器的电路结构、技术指标、类别特点等，让读者对功率放大器有个总体的认识。第二章介绍常用音响元器件的识别和检测、功率放大器的基本电路形式、功率放大器的附属电路以及印刷电路板设计制作、元器件布局焊接等，为读者成功制作功率放大器做好准备。第三章介绍功率放大器的调试、检测及故障检查等，对读者在装调功率放大器时可能碰到的一些具体问题做了前瞻性的介绍。第四章介绍十几款功率放大器制作的全过程，供音响爱好者在制作功率放大器时参考，制作实例中兼顾不同层次音响爱好者的实际需要，既有供初学者制作的集成电路功放，也有供具有一定电子基础的制作者

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。¹

制作的晶体管功放，还有供喜欢胆机的音响发烧友制作的电子管功放，以及一些名机的仿制。

本书既可作为电子爱好者的自学读物，又可作为音响技术、家电维修技术的岗位培训教材，还可作为大中专院校相关专业的第二课堂实践教材。

限于作者水平，书中错误在所难免，敬请读者批评指正，以利再版时修改。

作者

2002. 6

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 功率放大器的电路结构	(1)
第二节 功率放大器的技术指标	(2)
第三节 功率放大器的类别特点	(4)
第二章 功率放大器制作基础	(14)
第一节 常用音响元件的识别和检测	(14)
一、电阻器	(14)
二、电位器	(19)
三、电容器	(24)
四、变压器	(31)
五、晶体二极管	(36)
六、稳压二极管	(40)
七、晶体三极管	(41)
八、场效应管	(49)
九、电子管	(54)

十、达林顿管	(72)
十一、集成电路	(73)
十二、散热片	(80)
十三、继电器	(82)
第二节 功率放大器的基本电路形式	(83)
一、晶体管功率放大器	(83)
(一) 甲类放大器	(83)
(二) 滑动甲类放大器	(84)
(三) 乙类放大器	(84)
(四) 甲乙类放大器	(84)
(五) 超甲类放大器	(85)
(六) 乙丙类放大器	(85)
(七) OTL 功率放大器	(86)
(八) OCL 功率放大器	(87)
(九) BTL 功率放大器	(88)
二、场效应管功率放大器	(89)
三、电子管功率放大器	(92)
(一) 标准接法, 自偏压方式	(92)
(二) 超线性接法, 自偏压方式	(92)
(三) 三极管接法, 自偏压方式	(92)
(四) 高输出功率接法, 固定负偏压方式	(94)
第三节 功率放大器的附属电路	(94)
一、电源电路	(94)
二、前置放大电路	(96)
(一) 信号选择控制电路	(98)
(二) 音量控制电路	(99)

(三) 音调控制电路.....	(102)
(四) 响度控制电路.....	(107)
三、功率放大器保护电路.....	(108)
四、DSP 声场处理电路	(109)
五、卡拉OK 电路.....	(110)
 第四节 印刷电路板制作与元器件布局	(114)
一、印刷电路板的类型.....	(114)
二、印刷电路板的设计.....	(115)
(一) 电路设计.....	(115)
(二) 封装设计.....	(116)
三、印刷电路板元器件布局及布线.....	(116)
(一) 印刷电路板元器件布局.....	(116)
(二) 印刷电路板的布线.....	(118)
四、印刷电路板的制作.....	(122)
五、元器件的焊接工艺.....	(124)
 第三章 功率放大器调试、检测与故障检查	
.....	(126)
 第一节 功率放大器的调试	(126)
一、OTL 功率放大电路的调试	(126)
二、OCL 功率放大电路的调试	(127)
 第二节 功率放大器的检测	(128)
一、额定输出功率的检测.....	(129)
二、频率响应的检测.....	(129)
三、信噪比的检测.....	(130)

四、总谐波失真的检测	(130)
五、互调失真的检测	(131)
六、转换速率的检测	(132)
七、输入阻抗的检测	(133)
八、输出阻抗及阻尼系数的检测	(133)
 第三节 功率放大器的故障检查与排除	(134)
一、完全无声	(134)
(一) 无工作电压	(134)
(二) 电路中断或短路	(135)
(三) 自激	(135)
二、元器件发热	(136)
(一) 电阻发热冒烟	(136)
(二) 散热器发烫	(137)
三、输出中点直流电位失常	(139)
(一) 中点直流电位失常的原因	(140)
(二) 解决中点直流电位漂移的方法	(140)
四、放大器自激	(141)
(一) 自激的故障现象	(141)
(二) 抑制自激的方法	(142)
(三) 抑制放大器的高频自激	(143)
五、重放声音小	(146)
六、重放声失真	(147)
(一) 小信号时失真	(147)
(二) 大信号时失真	(147)
七、重放噪声大	(148)

第四章 功率放大器制作实例 (154)

一、 $2 \times 75W$ TMOS150 功率放大器	(154)
(一) 电路特点.....	(154)
(二) 制作指导.....	(156)
(三) 注意问题.....	(158)
二、“傻瓜 185”功率放大模块	(158)
(一) 电路特点.....	(158)
(二) 制作指导.....	(159)
(三) 注意问题.....	(160)
三、LM3886 功率放大器	(160)
(一) 电路特点.....	(160)
(二) 制作指导.....	(162)
(三) 安装调试.....	(163)
四、STK4191 厚膜集成电路功率放大器	(164)
(一) 电路特点.....	(164)
(二) 制作指导.....	(166)
五、PASS 的“ZEN”功率放大器	(166)
(一) 电路特点.....	(166)
(二) 元器件选择.....	(169)
(三) 制作指导	(170)
六、Marantz9 (马兰士) 功率放大器 (仿制)	(171)
(一) 电路特点.....	(171)
(二) 制作指导.....	(177)
(三) 安装调试.....	(177)
七、纯甲类功率放大器.....	(181)
(一) 电路特点.....	(181)

(二) 制作指导.....	(185)
(三) 安装调试.....	(186)
八、威廉逊 40W+40W 再生功率放大器	(187)
(一) 电路特点.....	(187)
(二) 制作指导.....	(188)
九、动态偏压伺服功率放大器.....	(190)
(一) 电路特点.....	(190)
(二) 制作指导.....	(193)
十、双单声道 60W×2 场效应管功率放大器.....	(194)
(一) 电路特点.....	(194)
(二) 元器件选择.....	(196)
(三) 制作指导.....	(197)
十一、VAA-70 功率放大器.....	(199)
(一) 电路特点.....	(199)
(二) 制作指导.....	(201)
十二、电子分频高保真功率放大器	(202)
(一) 电路特点.....	(202)
(二) 制作指导.....	(207)
十三、三声道 UL 超线性电子管功率放大器.....	(210)
(一) 电路特点.....	(210)
(二) 元器件选择.....	(213)
(三) 制作指导	(217)
(四) 整机调试.....	(221)
(五) 注意问题.....	(225)
十四、数码卡拉OK 混响器.....	(226)
(一) 电路特点.....	(226)
(二) 制作指导.....	(227)

第一章 概 述

第一节 功率放大器的电路结构

在音响系统中功率放大器的作用是放大音源器材输出的信号，使信号有足够的功率推动音箱发出声音。

功率放大器工作于大电流和高电压的状态，因此在制作、安装和调试功率放大器的过程中，每一个环节都直接影响着功率放大器的正常工作以及重放声音的质量等。

对于功率放大器的一般要求是：足够大的输出功率、较小的失真、平坦的频率特性、较高的信噪比及较大的动态范围。

功率放大器的种类较多，但较常见的是纯功率放大器和合并式功率放大器。所谓纯功率放大器是指功率放大器中只有驱动放大和末级功率放大两部分电路，它与前置放大电路是分开成两个独立的器材。此类功率放大器一般都较为专业，适合于音响发烧友使用。所谓合并式功率放大器是指将前置放大电路、驱动放大电路及末级功率放大电路集中在-一个器材内，它较适合于普通家庭及音响爱好者使用，是最常见的一种功率放大器。

图 1-1 为最基本的功率放大器的电路结构方框图。从图中可以看出，左右两个声道的电路是完全相同的，输入信号的选择电路主要用于对输入的信号进行选择切换，前置放大器对输入信号选择电路所选择的音频信号进行电流放大，为了能够有足够的功率去推动音箱，各声道均设有推动级，即前级放大器，进一步对前置放大电路输出的信号进行电压和电流放大，放大后的信号再经过末级功率

放大级进行放大，就可以去推动音箱重放声音了。

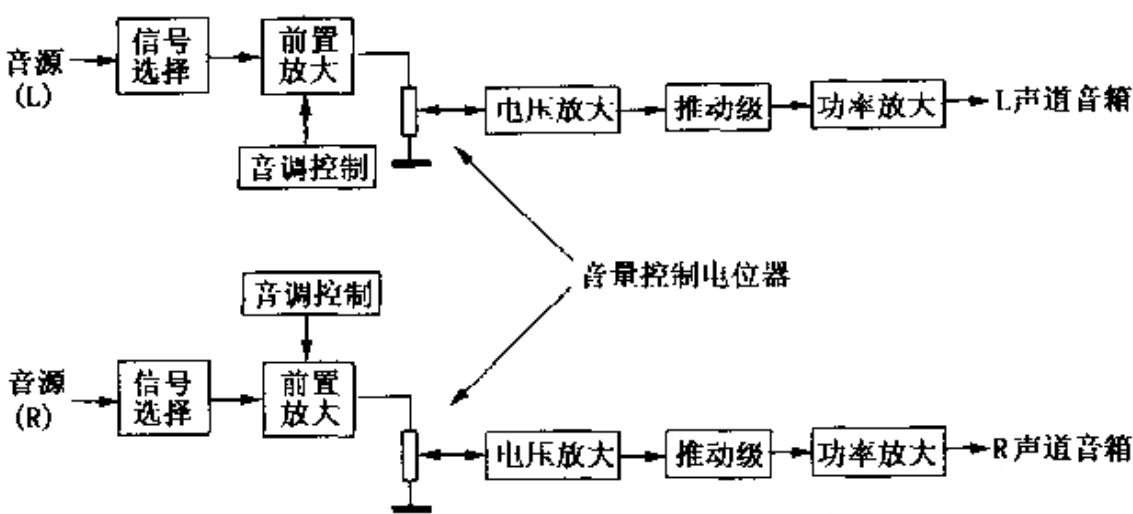


图 1-1 功率放大器的电路结构方框图

第二节 功率放大器的技术指标

功率放大器的技术指标较多，主要有以下几项。

1. 输出功率

输出功率是功率放大器的主要技术指标之一，但各个放大器生产厂家所标注的方法有所不同，如：正弦波输出功率、最大输出功率、有效输出功率、连续输出功率、RMS 输出功率等等。常用的是额定输出功率和最大输出功率。

额定输出功率是指在一定的谐波失真系数和一定的频率范围的条件下所测出的功率放大器的输出功率。

最大输出功率是指在一定的负载上，功率放大器在规定谐波失真系数时，采用 1000Hz 的正弦波检测信号所得到的连续最大的输出功率。

目前，大部分功率放大器所标注的输出功率为最大输出功率或峰值功率，在业余条件下，功率放大器的额定输出功率可以通过以

下两式进行换算：

$$\text{额定输出功率} = \text{最大输出功率} \times 0.8$$

$$\text{额定输出功率} = \text{峰值功率} \times 0.5$$

2. 放大器增益

放大器增益也称放大倍数，是衡量放大器放大能力的一项指标。它是放大器的输出电压与输入电压、输出电流与输入电流或输出功率与输入功率之比。如：放大器的电压增益是放大器的输出电压与放大器的输入电压之比；电流增益是放大器输出电流与放大器的输入电流之比；功率增益是放大器的输出功率与放大器的输入功率之比。

3. 频率响应

频率响应反映了功率放大器对各种频率信号放大的情况，品质较高的放大器能够重放频率范围较宽的信号，而品质一般的放大器则只能放大较窄频率范围的信号。功率放大器的频率响应范围一般均应在 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 。

4. 信噪比

所谓信噪比是指信号电平与噪声电平的比率，用 S/N 表示， S 为信号电平， N 为噪声电平。信噪比越高说明放大器的噪声越低。

5. 失真

所谓失真就是经过放大器放大输出的信号与放大器输入的信号在几何形态上产生了变化，也就是说失去原信号中的部分成分。

失真的种类很多，主要有谐波失真、互调失真、交叉失真、瞬态失真、相位失真及开关失真等等。引起失真的原因也较多，如：谐波失真主要是由于放大器的非线性而产生；相位失真是由于放大器对不同频率产生的相移的不均匀性而产生；互调失真则是由各个频率信号之间的互调制而产生。总之，失真会使放大器输出的信号经过扬声器重放产生一定的畸变。如：谐波失真会使声音走调；互调失真会使声音尖刺、混浊；瞬态失真会使声音变抖动、不清晰；交

越失真会使重放声产生间歇感。

6. 动态范围

动态范围是指放大器的最高输出电压与无信号时的输出噪声之比。它也表示了功率放大器重放声的动态范围以及对微弱信号的表现能力，但一般动态范围受到放大器的输出功率等方面的影响。

7. 瞬态响应

瞬态响应是指放大器对脉冲信号（瞬时大信号）的跟随能力。从声音重放的角度来说，如果放大器的瞬态响应较好，重放时声音就干净、利落，而放大器的瞬态响应较差的话，重放时声音就会含糊不清、拖泥带水。

另外，目前常用转换速率（SR）来衡量放大器的瞬态响应。所谓转换速率是指放大器在单位时间内信号电压的变化量，其单位为 $V/\mu s$ 。比如放大器的 SR 为 $20V/\mu s$ ，即表示放大器的输出电压在 $1\mu s$ 时间内最多可变化 $20V$ 。SR 是说明放大器输出电压变化速度的一个参数。

一般前置放大器的 SR 能够达到 $5V/\mu s$ 就可以满足前置放大器的要求。对于用运算放大器制作的前置放大器，如果 SR 较低的话，放大器信噪比就会下降，并会产生附加相位变化，使重放声变差。

一般功率放大器的 SR 能够达到 $50V/\mu s$ 即可达到高保真瞬态响应的要求。

8. 阻尼系数

所谓阻尼系数是表达功率放大器内阻的指标，它与扬声器的阻抗成正比，通常阻尼系数越大，扬声器的失真就越小。

第三节 功率放大器的类别特点

功率放大器种类较多，其重放声因不同类型而各具特色。

1. 晶体管功率放大器

20世纪60年代晶体管的问世，揭开了现代功率放大器的序幕，各种晶体管功率放大器层出不穷，如：甲类功率放大器、超甲类功率放大器、甲乙类功率放大器……在音响发烧友中，一般称晶体管功率放大器为“石机”，它是目前较为普遍的功率放大器。晶体管功率放大器制作成本较低，制作过程也较为简单，且电路的变化较多，输出功率可做得较大，重放声清丽脱俗，非常适合作为普通家庭及音乐爱好者欣赏音乐之用。

从音响发烧友的角度来看晶体管功率放大器，他们认为晶体管功率放大器的技术指标尽管做得很好，但音乐的重放是依靠人们的耳朵来进行欣赏的，器材重放声的一些内在的“东西”是无法用技术指标来表达的，例如：对功率放大器重放声评价常用的“解析力”这一词，反映了功率放大器重放声的“透明”度，但它是无法用技术指标表达的。音响发烧友认为，用自己的耳朵来检验功率放大器的重放声是最简便有效的途径，他们普遍觉得晶体管功率放大器尽管在某些方面占有优势，但重放声较为生硬（即通常所说的“数码声”），这一点是无法与电子管功率放大器比拟的。

笔者认为，对音乐的欣赏与欣赏者的文化素质、民族特点、欣赏习惯、心理及生理因素等有关，不可一概而论，只要在音乐的欣赏中自身得到快乐，这个功率放大器就是好器材。

2. 电子管功率放大器

电子管放大器是一种较为古老的放大器。电子管放大器重放声温暖通透，低频柔和，高频亮而不刺，让人难以忘怀，一些资深的音响发烧友一直使用着它。随着音响技术的不断普及，近几年电子管功率放大器又逐渐流行起来。电子管放大器与晶体管放大器相比，其开环指标较好，无互调失真，热稳定性好。同时由于电子管是电压控制器件，只要控制栅极上有电压信号，就可以在阳极上得到放大的电压信号，因此电子管放大器对微小信号的表现较好。但是电

子管功率放大器的制作较为困难，且存在耗电大、体积较大、电子管有一定的使用期限等缺点，因此在实际使用中有一定的局限性。

目前市场中电子管功率放大器的价格一般均在3 000元以上。与晶体管功率放大器相比，电子管功率放大器有着较严格的生产工艺和要求。电子管电源变压器和输出变压器的造价较高。高质量的胆机离不开优质的变压器，目前电源变压器在技术上已不存在问题，输出变压器却是决定电子管功率放大器音质的关键所在，一些著名的电子管功率放大器生产厂家，如麦景图、马兰士等，其胆机输出变压器的绕制工艺、材料以及测试参数至今仍属于保密技术，不对外公布，成品输出变压器内部也用环氧树脂密封，使外人无法拆卸、解剖。输出变压器不同，音色肯定不同，没有优质的输出变压器，其他制作环节再好也毫无意义，这也是一些制作高手仿制名机时始终无法获得与原机相同的音色的根源所在。因此，凡是有名的胆机厂家无不把输出变压器上下足成本。

20世纪70年代，随着半导体工业的迅速崛起，电子管在电子领域的地位渐渐被晶体管代替，主要原因还是后者具有许多明显的优点，如：价格便宜、工作电压低、发热量相对较小、供电电路简单、体积小、易集成等，而电子管由于其工作原理和结构的原因，其体积无法缩小至集成电路的水平，使其在众多的应用领域失去价值。目前只有一些特殊的领域，如：军用雷达系统、微波通讯、民用无线电广播发射等需要高压超大功率器件的地方还能见到它的身影，用量也日渐减少。

目前，一些音响杂志就电子管与晶体管谁优谁劣之争发表了较多的文章，喜欢电子管功率放大器的音响爱好者对胆机温暖醇厚的音色赞不绝口；喜欢晶体管功率放大器的音响爱好者被晶体管功率放大器重放的强劲力度和庞大的动态所折服。

电子管功率放大器的听音效果之所以使人感到温暖、醇厚，主要取决于电子管器件本身的优点：

(1) 电子管是一种工作在高电压小电流状态的电子器件，其输入阻抗较晶体管大得多，和多种信号源都能达到较佳的阻抗匹配，声音较为舒展自然。由于工作在数百伏的高压下，用它制作的放大器具有电压动态范围大、不易产生削波失真、声场延伸性好的特点。

(2) 电子管承受过载能力强，即使在使用中不慎输入极强的信号，也不易瞬间击穿短路而损坏电子管，只要外围电路不损坏，其工作状态会自动恢复；在输出过大的情况下，电子管产生的失真递增较缓慢，在听觉上不易察觉，使声场表现比较细腻温和，不会生硬刺耳。另外，相同型号和批号的电子管的特性曲线和参数的一致性较好，即使损坏，互换也非常方便。

(3) 电子管在正常工作状态下温度特性很稳定，因此其放大电路也远比晶体管电路简单，符合简洁至上的原则，一些经典电子管功率放大器电路均采用人工搭棚制作加上现代优质的阻容器件，使得这类胆机具有难以抗拒的魅力。

(4) 由于电子管通过输出变压器和扬声器相连，输出变压器可以看成一个电感线圈，在输出变压器阻抗端选择正确时，和喇叭的音圈（也等效为一个电感线圈）容易达到较佳的信号耦合，即使小口径的喇叭也能得到较丰满的声音，因此，一些效率很低的晶体管机难以驱动的小型书架箱用胆机推动却十分靓声。

电子管的这些优点，就是目前电子管功率放大器在现代音响界“重出江湖”的原因。不论是国内还是国外的电子管功率放大器生产厂家都充分利用电子管的这些长处，推出各种档次的电子管功率放大器来满足发烧友们对靓声的追求。虽然电子管具有上述优点，但电子管功率放大器的市场从目前来看是不容乐观的，这是因为电子管的缺点也十分明显，主要有以下几点：

(1) 电子管电路工作时需要多种电源（如灯丝电源、帘栅极电源和阳极电源等），耗电量大（单灯丝加热耗电就达数瓦至数十瓦），供电电路复杂，产生的干扰不易完全消除，效率和信噪比较晶体管

机低。

(2) 电子管的寿命受阴极材料的限制，一般累计使用几千小时后就渐渐开始趋向老化失效，比具有数万小时寿命的晶体管要短得多。目前电子管的生产厂家正在不断减少，不少型号的电子管因停产而发生短缺，现有的一些有名的靓声电子管也大多是 20 世纪 60~70 年代的库存品。从电子工业的发展来看，电子管退出市场只是迟早的事，那么这些音响电子管的价格随着数量的减少会逐步上升，因此胆机的换管将付出越来越昂贵的代价。

(3) 由于电子管器件的结构特点，胆机中电子管的体积比晶体管大得多，使用时散发热量大，除风冷外无法采用其他散热措施，必须有足够的散热空间才能保证其工作安全，使得电子管在小型音响设备中（如随身听）毫无用武之地，使用领域大受限制。

(4) 电子管使用时采用接插式管座，玻璃外壳承受机械振动的能力比晶体管差，使用中管座温度很高，时间一长管脚与管座间易氧化产生接触不良，不适合在户外移动环境中使用，更无法满足流动性大的专业音响系统的要求。

(5) 电子管功率放大器必须通过输出变压器才能驱动扬声器，而决定音质的输出变压器无论选材如何优质、制作工艺如何考究、精湛，都无法避免分布电容与漏感分量的存在；输出变压器作为感性元件，对不同频率的信号传输具有不同的感抗，对高频的瞬态响应不如晶体管机，因此电子管功率放大器的声场解析力不如晶体管功放，显得较为圆滑。

(6) 由于电子管功率放大器使用的变压器除电源变压器外，还有输出变压器，使得胆机的重量较重，功率较大的胆机可重达数十公斤，搬动非常困难，在运输过程中容易摔坏；由于在生产上采用人工搭棚工艺，胆机的生产效率是相当低的，制作成本高居不下。

(7) 电子管功率放大器的设计思路突出在简洁靓声方面，除了一些极品胆机外，大多数胆机在功能和操作性方面明显不如晶体管

机，如：遥控、监听、音调调节等等，在AV领域中，纯胆系统几乎是不可能的事情，因为电子管无法像晶体管一样做成集成电路。

3. 场效应管功率放大器

1977年，日本日立公司生产出世界上第一只场效应管，从此场效应管开始在功率放大器中使用。场效应管是一种新型的半导体管，是利用PN结反向偏置而调制沟道电导的电压控制器件。它具有输入电阻高（达 $10^{15}\Omega$ ）、噪声系数小、高频特性好、抗干扰能力强、无二次击穿、高耐压、工作电流大等特点。它主要有结型和绝缘栅型两种，在音响电路中使用较多的是绝缘栅型场效应管。场效应管不仅具有晶体管的优点，还具有电子管的特点，由于它是电压控制器件，因此具有噪声低、温度稳定性好、重放声具有电子管的音色等特点。采用大功率场效应管制作的功率放大器其频率响应一般为20Hz~20kHz（±1dB），失真度为0.05%以下，因此目前较为流行的是场效应管功率放大器。

4. 电子管、晶体管混合功率放大器

目前市场中有一种将电子管和晶体管相组合的功率放大器，其目的是保留电子管温暖、甜美的音色，同时又拥有晶体管耐用和瞬态特性好的良好优点。

电子管、晶体管混合功率放大器俗称胆（电子管）石（晶体管）合并功率放大器，一般用于中、高档的产品中，大多数的胆石机的前级均采用电子管，而后级采用晶体管，也有的胆石机在前后级中电子管和晶体管混合使用。

胆石机在声音表现方面较全面，重放的音色介于电子管与晶体管之间。

5. 集成电路功率放大器

20世纪50年代末，美国率先研制出音响新器件——集成电路。至70年代，集成电路放大器以价格低廉、功能齐全等特点在功率放大器中广泛使用。

集成电路功率放大电路主要有二类，即厚膜集成电路和运算放大集成电路。以前运算放大集成电路的功率较小，重放的音质也较差。随着电子技术的不断发展，伴随 NE5532、NE5534、M5128 等高品运算放大集成电路的出现，在一些音响器材中开始大量使用运算放大集成电路。

厚膜集成电路在 20 世纪 70~80 年代使用较为普遍，一些组合音响中的放大器件均使用了厚膜集成电路，如：STK4191、STK465 等等。

采用集成电路制作的功率放大器，制作较为简便，成本低廉，重放音质尚可，故一些中、低档的功率放大器目前还使用集成电路作为放大器件。

采用集成电路制作的功率放大器的缺点主要是失真较大。

6. AV 功率放大器

AV 功率放大器是家庭影院系统的中心，是将音频及视频信号控制集于一身的视听器材。AV 功率放大器具有切换各种视听信号、改变各种声场模式、对各声道输入信号进行放大，并对其中的信号进行音量、混响延时控制等功能。AV 功率放大器与高保真功率放大器相比，最明显的区别就在于还声声道数的不同，高保真功率放大器只有二个声道，而一般的 AV 功率放大器具有 5~7 个声道；AV 功率放大器的电路集成度高、电路复杂、信号的处理程序多，而高保真功率放大器的放大电路相对较为简单。下面简要介绍一下 AV 功率放大器的分类、各声道的作用及电路结构。

目前市场上的 AV 功率放大器的品种繁多，总的概括起来可分为以下三种。

(1) 准四声道环绕声功率放大器。它一般有两种类型，一是在一对主音箱的基础上，在末级功率放大管的前级取出左右声道的信号，再经过一只小功率的功率放大模块放大后，去推动一对环绕音箱，此类 AV 功率放大器基本上无环绕效果，只能在欣赏者的后面

产生一定的声音；另一是取出左右声道的信号经过斗链式延迟模块或数字式延迟模块后，由一只小功率的放大模块放大后去推动环绕音箱，可以产生一定的环绕效果。有的准四声道环绕声功率放大器内部带有简单的声场处理电路，可以模拟出影剧院、运动场等现场的音响效果。由于准四声道环绕声功率放大器的声场是建立在左右两只音箱的双声道的基础上的，因此，不能产生真正的环绕声效果。

(2) 具有杜比环绕声解码功能的 AV 功率放大器。此类 AV 功率放大器的面板上都有经过美国杜比公司认证的“DOLBY”标志，其节目源的四声道信号录制时进行矩阵编码后形成双声道形式记录，重放时经过杜比解码器解码后还原成四声道信号，因此，具有杜比解码功能的 AV 功率放大器的内部都具有四路独立的功率放大电路。同时具有杜比环绕声解码功能的 AV 功率放大器的内部带有 DSP 声场处理模块，可以产生较为理想的各种声场的重放特性，目前市场中的大部分 AV 放大器均为此类放大器。

(3) 具有杜比 AC-3、THX 等解码功能的功率放大器。此类功率放大器最大的特点是具有全数码环绕声 5~7 个声道，且后置环绕声道是完全独立的，并具有 20Hz~20kHz 的全频带立体声方式，因此重放效果更具临场感。此类 AV 放大器电路很复杂，一般是手工所制作不了的。

AV 放大器功能较多，不仅可以对多个声道同时进行放大，还可以模拟一些声场的重放特性，故其内部的电路较为复杂。AV 放大器内部电路的组成如图 1-2 所示。它由信号源选择电路、信号处理电路、多声道功率放大电路等组成。信号源选择电路的主要作用是选择、切换和控制各种音、视频信号源输入的各种信号，如：家用录像机、激光视盘机。一般普及型的 AV 放大器是通过机器面板上的选择开关的旋转来进行各种信号源的切换，而在一些功能较多的 AV 放大器上，是通过遥控器发出指令给机器中的 CPU（微处理器），然后由 CPU 对所接受的指令进行译码处理，并向各个功能电

路（如音量、音调等）发出操作指令，进行各种功能的转换及调节。信号处理电路的中心部分是杜比环绕声解码器和 DSP 声场处理模块。杜比解码器对信号源输入的信号进行解码后，将重放软件中经过编码的二声道信号恢复为左前、右前、左后、右后四个声道信号及将左右二个声道信号相叠加后而产生的中置声道信号。AV 放大器中的 DSP 声场处理模块可以将信号源输入的信号模拟成与各种实况声场的重放特点相近的重放声场。多声道功率放大大部分的作用是将信号处理电路输出的多声道信号，输送至各自独立的放大器中进行放大，然后输出至各路音箱进行重放。

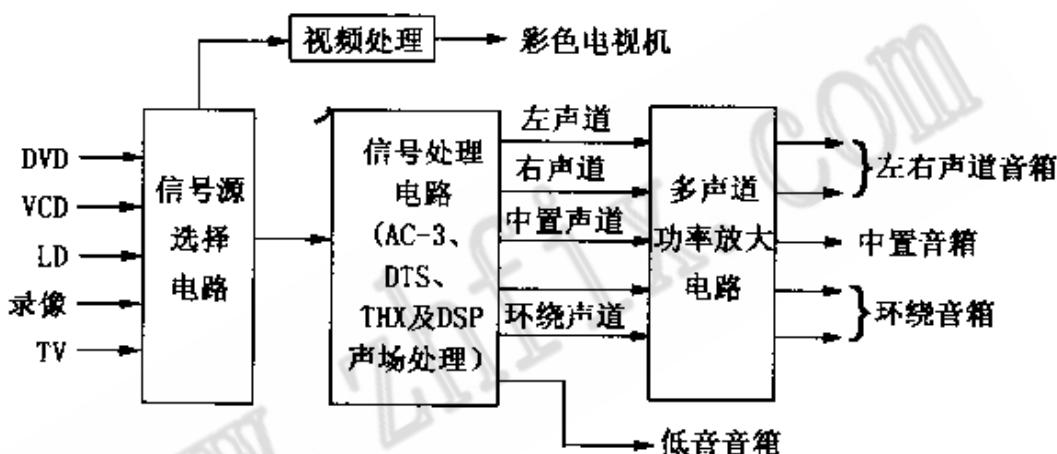


图 1-2 AV 功率放大器的电路组成

在具有杜比解码功能的 AV 放大器中，最基本的应具有左、右二个声道，一个中置声道及一个环绕声道，共四个声道的独立放大电路。在有的 AV 放大器中还设有一个超重低音声道的放大电路，以增加重放声中的重低音效果。

AV 放大器是通过各个声道的重放声形成一个具有空间感和定位感的完整声场，使欣赏者仿佛置身于重放软件的剧情中。各个声道之间的作用是相辅相成的，如果缺少了其中的某一个声道的信号，或者某一个声道的信号过强或过弱，重放的声场就不能达到一个完美境界。

左、右主声道在重放声场中担任了主声场的角色，各种重放软件中的主体声场主要是由左、右声道产生的。比如在重放有关战争故事片时，战争场面中远处隆隆的炮声，各种战车的轰鸣声，其宏大的声场均由左、右主声道来表现。

由于左、右主声道的声场包含了整个重放声场中的信号，因此对左、右主声道的各种性能要求和高保真音响系统中的左、右声道的性能要求一样，能够重现全部频率的宽度，具有较好的频谱特性，并提供足够的输出功率，以保证达到一定的响度，而且还应具有较低的失真。

中置声道在家庭影院重放过程中主要担负着表现剧情中人物的对白重任。在传统的双声道放大器中，表现人物对白特别是人物移动时的对白，会出现中间声场脱节的现象，而有了中置声道后，使重放软件中人物对白的声场与画面相吻合，得到声像合一的重放效果，同时对画面中其他的声音和音乐也能起到与左、右声道相协调的效果，特别是当一个声源从左边移至右边时，中置声道起到了保持音色质量的效果，从而弥补了普通双声道中间声场不足的缺陷。

第二章 功率放大器制作基础

第一节 常用音响元件的识别和检测

电子元件是组成功率放大器的最小单位，因此掌握电子元件的结构、性能、工作原理、特点及检测方法，对于阅读功率放大器的电路图、了解功率放大器的工作原理、顺利进行功率放大器的装调和检修是大有帮助的。

一、电阻器

1. 电阻器的类别

电阻器是功率放大器中使用最多的元件，按照其用途的不同可分为普通型电阻和特殊型电阻。功率放大器中常用的都是普通型电阻。按照电阻器的制造材料不同可分为炭膜电阻、金属膜电阻、合成膜电阻等等，功率放大器中使用最多的是炭膜电阻、金属膜电阻。表 2-1 为常见电阻器分类的字母及数字含义。

表 2-1 常见电阻器分类的字母及数字含义

制作材料		分类	
代表字母	含义	代表数字	含义
T	炭膜型	1	普通型
H	合成炭膜型	2	普通型
S	有机实心型	3	超高频型
N	无机实心型	4	高阻型

续表

制作材料		分类	
代表字母	含义	代表数字	含义
J	金属膜型	5	高温型
Y	氧化膜型	6	
C	沉积膜型	7	精密型
I	玻璃釉膜型	8	高压型
X	线绕型	9	特殊型

(1) 炭膜电阻器。这种电阻器是用结晶炭沉积在瓷棒或瓷管上制成的。改变炭膜的厚度和用刻槽的方法变更炭膜的长度可以得到不同的阻值。炭膜电阻器的主要特点是高频特性好，价格低。

(2) 金属膜电阻器。这种电阻器的电阻膜是通过真空蒸发等方法，使合金粉沉积在瓷基体上制成的。刻槽和改变金属膜的厚度可以精确地控制阻值。金属膜电阻器的主要特点是耐热性能好，其额定工作温度为70℃，最高可达155℃。它与炭膜电阻器相比，体积小、噪音低、稳定性好。它的工作频率也较宽，但成本稍高。

(3) 线绕电阻器。这种电阻器是用电阻率较大的镍铬合金、锰铜等合金线在陶瓷骨架上缠绕而制成的。它耐高温(能在300℃的高温下工作稳定)、噪声小、阻值的精度高等。线绕电阻器的额定功率较大(4~300W)，常用在电源电路中作为限流、泄放电阻等，也可制成精密型电阻器。一般的线绕电阻器由于结构上的原因，不宜用在高频电路中。

图2-1为电阻器外形及电路符号。

2. 主要参数

标称阻值、允许误差和额定功率是固定电阻器的主要参数，了解这些参数的定义以及标志方法后，就能正确选用各种电阻器。

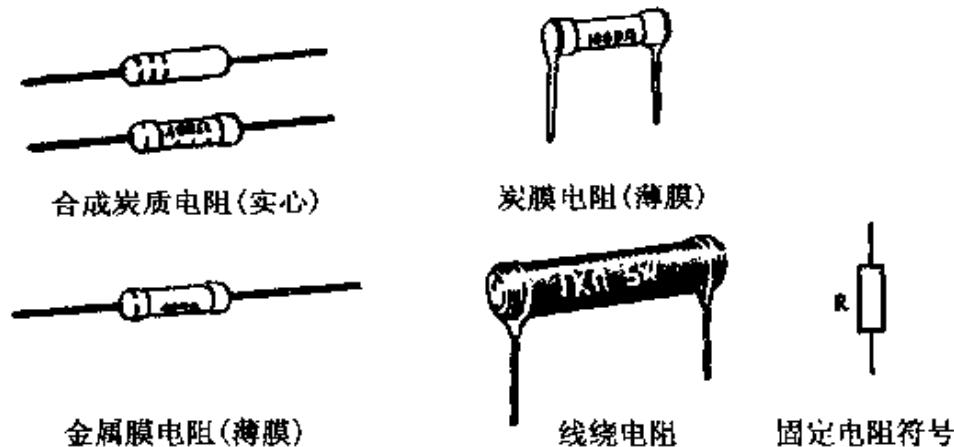


图 2-1 电阻器外形及电路符号

(1) 标称阻值和允许误差。电阻器上都标有电阻的数值，这就是电阻器的标称阻值。它和实际值不完全相符。实际值和标称值的偏差除以标称值所得的百分数，叫电阻的误差，它反映了电阻器的精度。不同的精度有一个相应的允许误差。现在成品固定电阻器大都为Ⅰ级或Ⅱ级，其误差分别为5%和10%。

(2) 额定功率。当电流通过电阻器时，电阻器便会发热。如果电阻器发热的功率过大，电阻器就会烧坏。电阻器长时间正常工作允许所加的最大功率叫做额定功率。通常有 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ 、1、2、5、10W等。在选择电阻器时应一般留有一定的余量，最好实际电阻器所承受功率的规定值的30%左右。

3. 参数识别方法

电阻器的额定功率、阻值及允许误差一般都标在电阻器上。额定功率较大的电阻器，一般都将额定功率直接印在电阻器的表面上。额定功率较小的电阻器，可以从它的几何尺寸和表面积上看出。电阻值及允许误差有二种表示法，即直标法和色标法。

所谓直标法是将电阻器的标称阻值和允许误差直接用数字标于电阻器的外壳上，主要用于一些功率(体积) 较大的电阻器，例如：在电阻器上标有“ $1k\Omega \pm 10\%$ ”，则表示该电阻的标称阻值为 $1k\Omega$ ，允

许误差为±10%。

所谓色标法是用标在电阻体上不同颜色的色环作为标称阻值和允许误差的标记。普通精度的电阻器用4条色环表示，左边为第一色环，顺次向右为第二、第三、第四色环。各色环所代表的意义为：第一、二色环相应地代表阻值的第一、二位有效数字，第三色环表示第一、二位数字后加0的个数，第四色环代表阻值的允许误差，如图2-2所示。表2-2为电阻器色标法的色码含义。

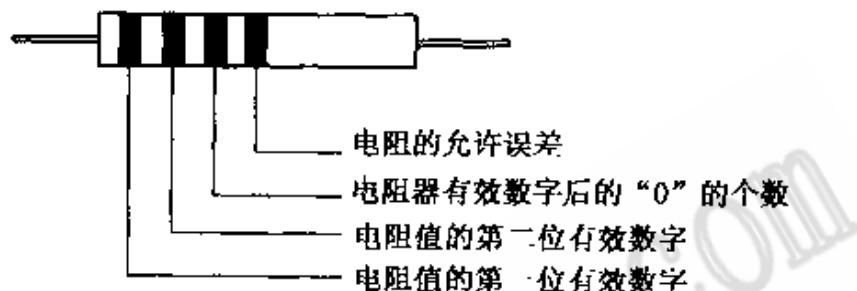


图2-2 电阻器色标法示意图

表2-2 电阻器色标法的色码含义

颜色	第一色环	第二色环	第三色环(倍率)	第四色环(允许误差)
黑	0	0	$\times 10^0$	—
棕	1	1	$\times 10^1$	—
红	2	2	$\times 10^2$	—
橙	3	3	$\times 10^3$	—
黄	4	4	$\times 10^4$	—
绿	5	5	$\times 10^5$	—
蓝	6	6	$\times 10^6$	—
紫	7	7	$\times 10^7$	—
灰	8	8	$\times 10^8$	—
白	9	9	$\times 10^9$	—
金	—	—	$\times 10^{-1}$	±5%
银	—	—	$\times 10^{-2}$	±10%
本色	—	—	—	±20%

例如：一色环电阻从第一色环至第四色环的颜色分别为“棕黑橙银”，表示该电阻器的标称电阻值为 $10 \times 10^3 \Omega \pm 10\%$ 。

4. 电阻器的选用

电阻器应选择接近计算值的一个标称值，一般电路选级的允许误差就可以了，若有精度要求，则应选精密电阻器。电阻器的额定功率应选用比实际承受功率大 $1.5 \sim 2$ 倍的，才能保证耐用可靠。在某些场合，也可将小功率电阻器串、并联使用，以满足功率的要求。

电阻器在安装时，它的两条引出线不要从根部打弯，须留出一定的距离，否则容易折断。焊接时，不要使电阻器长时间受热，以免引起阻值变化。大于 10 瓦的电阻器，应保证有散热的空间。电阻器在装入电路之前，要核实一下阻值。安装时要使标志处于显目的位置。

5. 电阻器的检测

电阻器的检测一般有在线检测和脱开检测二种方法。对于电阻器的检测主要是检测其标称阻值是否发生了变化。通过检测标称阻值的变化，判断电阻器是否开路、短路及阻值变化等。

在线检测即不将电阻器从电路上拆下来，直接在电路板上进行检测。在检测某一电阻器时，将万用表的表笔直接搭接于电阻器的焊点两端，分别将红黑表笔互换检测二次，因为在电路中通常接有三极管，其 PN 结会对检测的结果产生影响，因此取所检测出阻值大的一次的电阻值为检测结果。当检测出电阻值大于该电阻器所标的标称阻值时，可判断为其存在开路性故障。当检测的电阻值小于该电阻器所标的标称电阻值时，不可立即判断其已短路，因为在电子电路中接有众多的网络，若在所检测的电阻器的电路中并接有电感器时，此时检测到的电阻值很小，应该再进一步检查一下电路中是否接有电感器，若电路中没有，则可判断为其已出现短路性故障。

脱开检测是将电阻器从电路板上拆下来进行检测。此方法检测的结果较为准确，但较为烦琐。通常的做法是用一锋利的小刀切断电

阻器的其中一个引脚的线路板，检测后再将此切口焊上即可，如图 2-3 所示。

在检测电阻器时还必须注意以下几方面的问题：

(1) 在线检测电阻器时，一定要切断功率放大器的电源，否则会损坏万用表。

(2) 在检测电阻器之前，可先采用直观检查法观察电阻器的外表有无发黑或引脚焊点松动现象，若存在有这两个现象，则可直接更换该电阻器或对其引脚进行补焊。

(3) 当电路中的电阻器损坏而暂时无法有同型号的电阻器更换时，可采用并、串的方法用不同阻值的电阻器进行替换，但在替换时需要考虑电阻器额定功率。

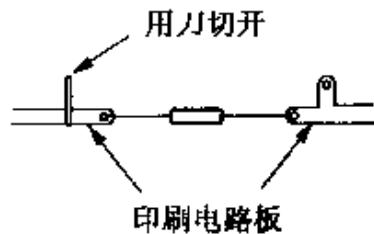


图 2-3 脱开检测电阻器的方法

二、电位器

1. 电位器的类别

电位器又称可变电阻器，它实际上是一只可连续变化阻值的电阻器，其外形及电路符号如图 2-4 所示。

电位器的种类较多，按照其操作的形式可分为直滑式和旋转式两种。直滑式是将电位器的动片作直线运动来改变其阻值，而旋转式是通过左右转动转柄来调节动片的位置达到改变电阻值的目的。目前使用较多的是旋转式电位器。

按照电位器的联数来分，可分为单联电位器和双联同轴电位器。单联电位器通过操作转柄只能控制一个电位器阻值的变化，它是使用最为广泛的电位器。双联电位器则是将两个电位器层叠组合在一起，通过一个转柄来同时控制两个电位器的阻值进行同步变化。

按照电位器有无开关来分，可分为不带开关电位器和带开关电位器，前者较为普遍，而后的电位器中带有一开关装置，通常用

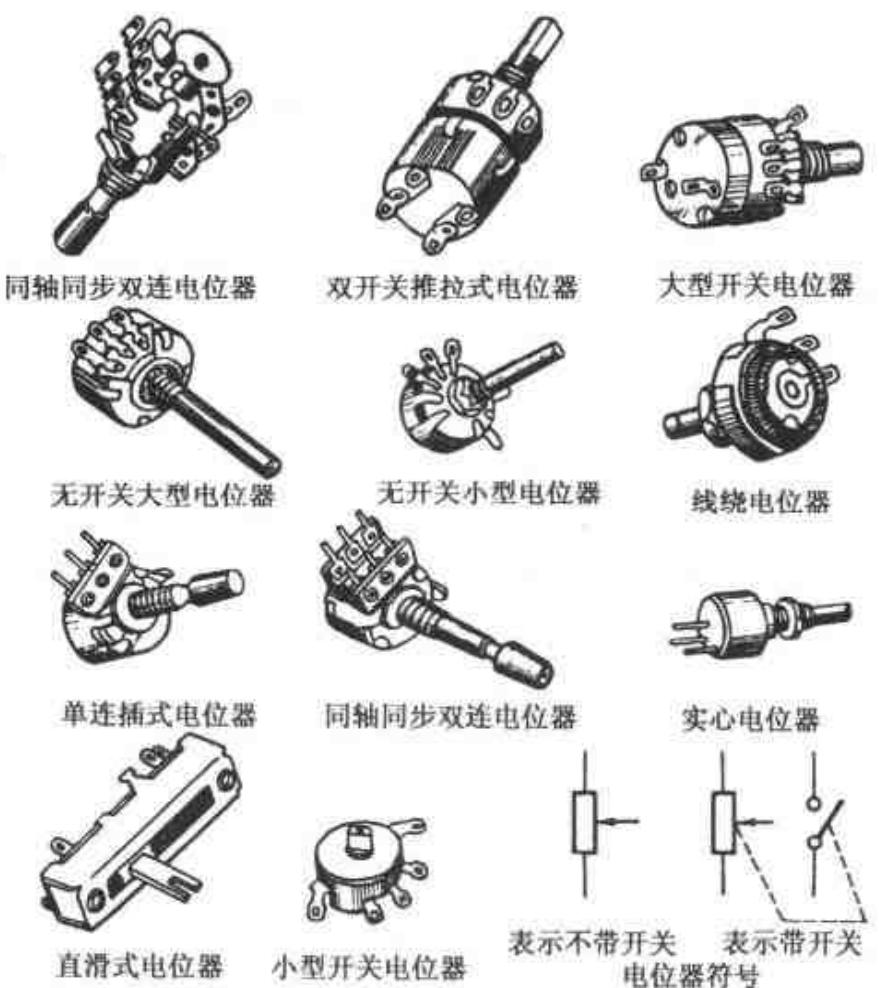


图 2-1 电位器外形及电路符号

于收音机中作为带电源开关的音量控制。

按照电位器的输出函数特性来分，可分为线性电位器（X型）、对数式电位器（D型）和指数式电位器（Z型）。对这三种电位器的特性必须有一定的了解，因为音响器材中都分别使用了这三种电位器。图2-5为三种不同函数特

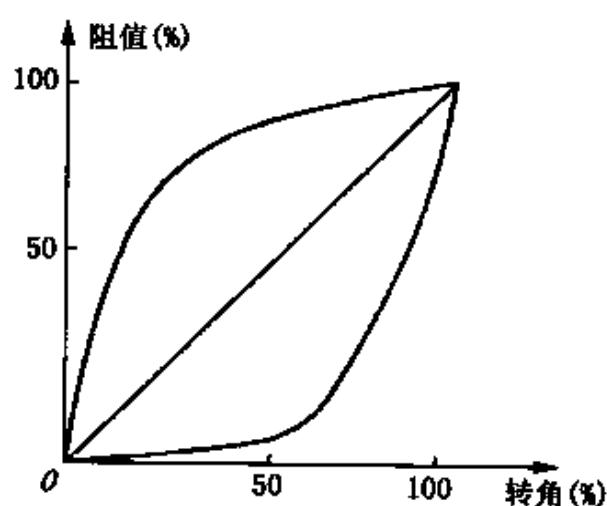


图 2-5 不同函数特性电位器的输出特性

性电位器的输出特性。它们有着各自的阻值变化规律，相互之间不可互相代替使用。从图中可以看出，X型电位器的阻值变化规律是随电位器转柄的转动，阻值呈均匀的线性变化，故称为线性电位器。它主要用于前置放大器中左右声道平衡控制电路。Z型电位器的阻值变化规律随电位器转柄的转动，其阻值呈指数曲线变化，故称为指数型电位器，它主要用于前置放大器中的音量控制。人耳在听音时并没有感觉到重放声呈指数曲线变化，而是均匀地提升或下降，这是因为人耳听觉具有对数特性，即当音量较低时增加放大器的输出功率，人耳感觉较为明显，但是当音量大到一定程度后，即使再增加输出功率，人耳此时感觉不是很明显。在电路中使用了Z型电位器后，人耳所具有的对数特性与Z型电位器的指数特性相叠加，从而形成了线性特性。D型电位器的阻值变化与转柄的转动呈对数规律变化，它主要用于前置放大器的音调控制电路。

图2-6所示为X型和Z型电位器在功率放大器中的应用。图(a)为X型电位器在功率放大器中作为左右声道信号的平衡控制使用的电路图。电路中电位器二端片分别接于左右声道后级放大器

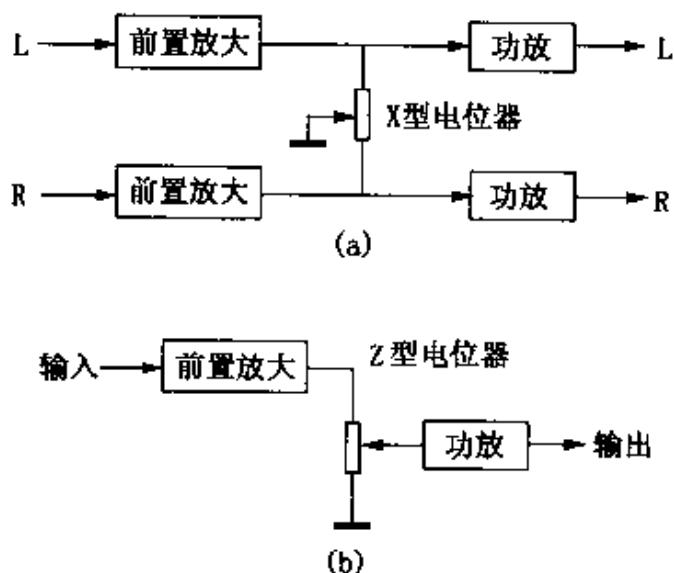


图2-6 X型和Z型电位器在功放中的应用

的信号输入端，电位器的动片处于中间位置时，对左右声道输入信号的对地分流量是相同的，故左右声道从前级放大器输入至后级放大器的输入信号的幅度是一样的，也就是说左右声道最终输出信号至音响重放的声音是相同大小的。如果此时需要左右声道输出的声音大小不同，可将电位器的动片向上（向下）移动，此时电位器动片以上的电阻值变小（变大），而处于动片以下的电阻值变大（变小），则动片以上的左声道后级放大器输入信号的对地分流量增大（减小），使左声道后级放大器输入信号的幅度减小（增大），从而使左声道重放音量变小（变大）。此电路由于采用了 X 型电位器（其电阻值是呈线性变化的），故电位器的动片上下移动时其阻值变化是均匀一致的，从而使左右声道的信号幅度的调节也呈均匀变化。

图 (b) 为一功率放大器的音量控制电路，接在后级放大器信号输入端的电位器采用了 Z 型电位器，根据前面所介绍的人耳所具有的对数特性，使用 Z 型电位器作为音量控制电位器，可使人感觉在调节音量时声音是均匀变化的。

传统的电位器一般都采用动片在涂有炭膜的绝缘片上滑动而去改变输出电压，动片在移动时与炭膜摩擦会产生一定的噪声，且无定位感，其使用寿命也只有 5000 小时左右，步进式电位器是采用导电定片外接金属膜电阻方式，如图 2-7 所示。由于定片外接的电阻采用了误差小于 0.5% 的金属膜电阻，因此噪声很低，动片移动时对电阻无任何磨损，且定位精度很高，其使用寿命可达 6~10 万小时，它是今后音响器材使用电位器发展的方向。

2. 电位器的主要参数

标称阻值、额定功率和运动噪声是电位器的三个主要参数。标

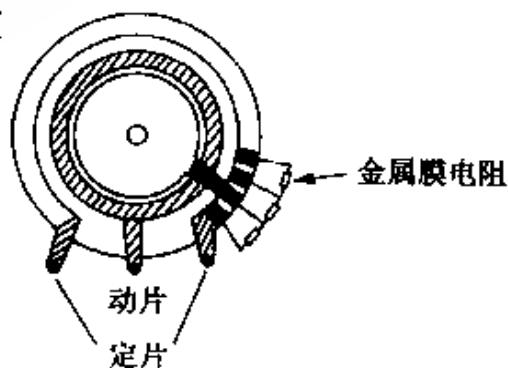


图 2-7 步进式电位器的结构

称阻值主要是指电位器二个定片之间的电阻值，一般在电位器的外壳均直接标明，若电位器的外壳上没有直接标明其标称阻值，可用万用表直接检测其二个定片之间的电阻值，得出的结果即为标称阻值。额定功率一般有 0.025W、0.05W、0.1W、0.5W、1W、2W、3W 等等，可根据电路的需要来选择不同额定功率的电位器。

运动噪声是电位器较为重要的一个指标，它包含了二个方面的内容，即动噪声和电流噪声。动噪声是电位器特有的噪声，由于电位器是通过动片在定片上滑动来调节其电阻值，故动定片之间的摩擦会产生一定的噪声，它与定片电阻体的结构、均匀度、动定片之间的配合等情况有关。动噪声是电位器较容易产生的故障之一。电流声则是电位器的动片不滑动时与定片之间产生的噪声，一般电位器电流噪声较小。

3. 电位器的检测

对于电位器的检测主要有二方面的内容，即检测其定片之间的标称阻值和阻值变化特性，检测方法如图 2-8 所示。

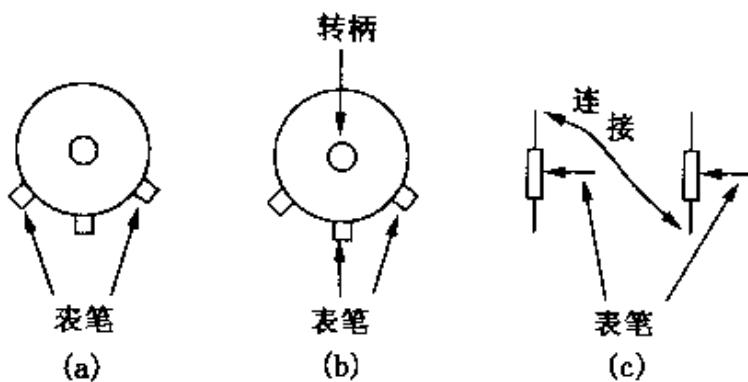


图 2-8 检测电位器的方法

首先检测电位器的标称阻值，如图 (a) 所示，将万用表的两表笔分别搭接电位器的两个定片的引脚，测出的阻值即为该电位器的总的电阻值，应与电位器的标称阻值相同。

检测电位器的阻值变化特性如图 (b) 所示，将万用表的其中一只表笔搭接电位器的定片，另一只表笔搭接电位器的动片，慢慢旋

转电位器的转柄，注意观察万用表的指针变化是否和电位器所标注的阻值变化规律的特性（Z、X、D）一致。在检测的过程中，如果万用表的指针的移动无跳变现象，说明电位器的动片和炭膜层转动配合较好，反之则说配合较差。

对于双联同轴电位器，在进行上述项目检测的同时，还可进行两只同轴电位器之间阻值变化同步性的检测，如图（c）所示，将两只电位器串联起来，然后旋转电位器的转柄，万用表的指针应始终指在电位器的标称阻值的位置，如果阻值出现了变化，则说明两只电位器的阻值变化的同步性较差，在重放时容易产生两个声道输出功率不一致的现象。

三、电容器

1. 电容器的类别

电容器是功率放大器中使用较多的元件之一，其外形及电路符号如图 2-9 所示。

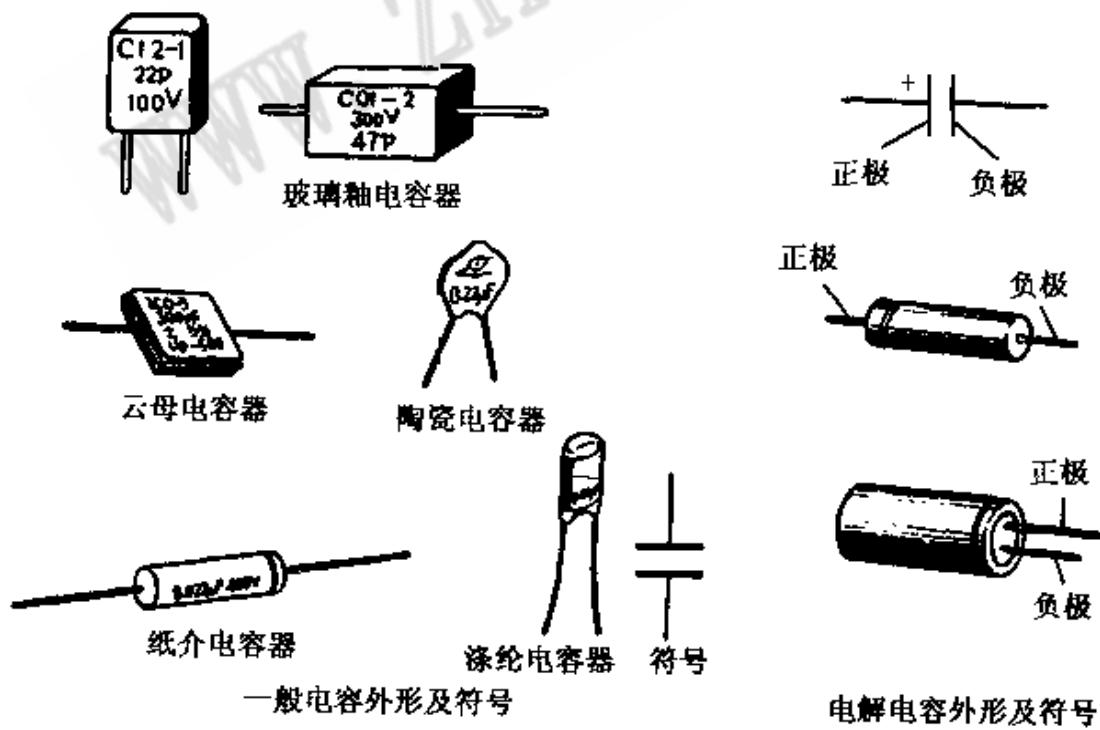


图 2-9 电容器的外形及电路符号

电容器的种类较多，在音响电路中使用的主要有以下几种。

(1) 瓷介电容。它属于无机介质电容。其特点是体积小、结构简单、性能稳定、不易老化。在音响设备中一般用于高频电路、反馈电路、退耦电路。

(2) 云母电容。它也属于无机介质电容，具有介质损耗小、绝缘电阻高、耐高温的特点。一般用于音响设备中的振荡电路及低通滤波器。其缺点是较容易受潮。

(3) 有机薄膜电容。按照其介质的不同，它可分为涤纶电容、聚苯乙烯电容、聚丙烯电容和聚乙稀电容。涤纶电容介质为聚酯材料，其体积较小，较适合于音响设备中作为耦合、滤波。聚苯乙烯电容介质是聚苯乙烯，它具有容量稳定、精度高、温度系数小的特点，适用于音响电路中作耦合、滤波旁路之用。聚丙烯电容主要特点是介质损耗特别小，绝缘电阻大，稳定性及频率特性很好，容量的精度也非常高，但缺点是体积较大，价格较高。它是制作音响设备的理想电容，在一些音响发烧友中，常常使用聚丙烯电容对已有的音响设备进行升级改造。聚乙稀电容的主要特点是耐高温，损耗小，抗腐蚀性较好，适合于温度较高的工作环境，在音响设备中可用作电路的耦合电容。

表 2-3 为电容器的字母所代表的介质含义。

表 2-3 电容器的字母所代表的介质含义

用字母表示电容器介质的含义			
字母	含义	字母	含义
C	瓷介型	D	铝电解型
Y	云母型	A	钽电解型
I	玻璃釉型	N	铌电解型
O	玻璃膜型	G	合金电解型
B	聚苯乙烯型	E	其他材料电解型

续表

用字母表示电容器介质的含义

字母	含义	字母	含义
Z	纸介型	Q	漆膜型
J	金属化纸介型	V	云母纸介型
H	混合介质型	T	低频瓷介型
L	涤纶型	LS	聚碳酸酯型
F	聚四氟乙烯型	G	高功率型

用数字表示命名方法

数字	含义			
	瓷介型	云母型	有机型	电解型
1	圆片	非密封	非密封	箔式
2	管型	非密封	非密封	箔式
3	叠片	密封	密封	烧结粉液体
4	独石	密封	密封	烧结粉液体
5	穿心		穿心	
6		支柱		
7				无极性
8	高压	高压	高压	
9			特殊	特殊

2. 电容器的主要参数

(1) 额定工作电压。它是指在规定的温度范围内，可连续加在电容器上的最大直流工作电压或交流电压的有效值。一般在电容器的外壳上均标注额定工作电压。

(2) 标称容量和允许误差。它与电阻器的一样，表示了电容器的容量及其允许误差。

(3) 绝缘电阻。它表示电容器绝缘性能的好坏。电容器的绝缘电阻与介质的体积、电阻系数、介质的厚度及极片的大小都有关系，电容器的绝缘电阻下降后，很容易被击穿损坏。

(4) 绝缘耐压。这一参数表示了电容器两引出脚之间及连接起来的引出端与金属外壳之间所能承受的最大工作电压。此电压一般为直流工作电压的1.5~2倍。它反映了电容器引脚之间与引出端及外壳之间绝缘层的绝缘强度。

(5) 电容器的损耗。它主要有三种，即电导损耗、极化损耗和电离损耗。

电导损耗是由于介质的漏电流而引起的。任何绝缘介质都不是理想绝缘体，所以任何一种介质都具有这种损耗。损耗的大小取决于介质材料的特性。同时还与材料的厚度、工作频率的高低以及环境温度有关。通常材料愈薄，工作频率愈高，环境温度越高，其损耗就越大。

极化损耗一般是电介质极化比较缓慢造成的。介质的极化一般有三种形式，即离子式、电子式、偶极子极化。电子式、离子式极化能量损耗是很小的，可以忽略不计；而偶极子极化属于缓慢极化的一种形式，其损耗大小与温度和频率有关。

电离损耗是电容器的介质与极板之间的边缘部分存在着空气隙。当气隙之间的电压超过电离电压时，这时气隙间产生放电，因而引起能量的损耗。表2-4为功率放大器中常用的电解电容器的型号含义及主要参数。

表2-4 功率放大器中常用的电解电容器的型号含义及主要参数

型号	含义	容量范围 (μF)	工作电压 (V)	漏电流 (μA)
CDX 1	轴向引出式电解	3~500	6~50	
CDX 3	单向引出式小型电解	5~100	6~50	$\leqslant 0.2CU + 10$
CD94、95	无极性电解	1~100	25~50	

续表

型号	含义	容量范围 (μF)	工作电压 (V)	漏电流 (μA)
CD11	铝电解	1~470	4~63	$\leqslant 0.03\text{CU} + 3$
CD12~14	铝电解	10~10000	6.3~450	$\leqslant 0.1\text{CU} + 100$
CD15	铝电解	22~3300	6.3~450	$\leqslant \text{CD} \times 0.1 + 100$
CD16	组合铝电解	22~330	50~450	$\leqslant \text{CD} \times 0.1 + 100$
CD26-2	铝电解	1~100	250~500	$\leqslant \text{CD} \times 0.1 + 100$
CD248	低压大容量铝电解	2200~100000	10~100	$\leqslant \text{kCU} \times 0.001$ (mA)
CD285	高压大容量铝电解	100~3300	160~450	$\leqslant 0.03\text{CU}$
CA	固体钽介质电解	0.1~470	6.3~100	$\leqslant 0.04\text{CU}$
CA1	液体钽介质电解	6.8~1500	6.3~125	$\leqslant 2\text{CU} \times 0.03$
CA3	液体钽介质电解	3.3~680	6.3~125	$\leqslant 2\text{CU} \times 0.03$
CA7	微型固体钽介质电解	0.1~33	2.5~40	$\leqslant 2\text{CU} \times 0.003$
CA9	无极性钽电解	0.22~220	6.3~63	$\leqslant 0.08\text{CU}$
CA30	液体钽介质电解	2.2~1500	6.3~160	$\leqslant 2\text{CU} \times 0.03$
CA42	微型钽电解	0.01~100	6.3~63	$\leqslant 0.04\text{CU}$
CA51	片状固体钽介质电解	1.5~47	6.3~16	$\leqslant 0.02\text{CU}$

3. 电容器的识别

电容器容量及其允许误差的标注方法较多，比较容易混淆，选用时应注意。

(1) 直标法。由于电容的单位法拉(F)较大，使用较少，经常使用的是微法(μF)及皮法(pF)。例如：6.8pF一般就写成6p8。对于小于1 μF 的电容器，其容量常用μ、n、p表示。

(2) 数字表示法。电容器的数字表示法有三位数表示法和四位数表示法两种。

①三位数表示法。用三位数表示电容器的容量时，单位为pF。前面的两位数是表示容量的有效数字，第三位则表示倍乘。如：“103”表示 $10 \times 10^3\text{pF}$ ，“223”则表示 $22 \times 10^3\text{pF}$ 。如果第三位数用9表示，则说明电容量在1~9.9pF之间，其倍乘为 10^{-1} 。

②四位数表示法。四位数表示法又分为两种。用整数表示其容量的单位是 pF，例如“2200”表示为 2200pF。用小数点表示其容量的单位则是 μ F，例如“0.033”表示其容量为 0.033 μ F。

(3) 色标法。所谓色标法是用某一种颜色表示电容器的容量，其颜色和容量的关系如表 2-5 所示。识别的方法是：第一、二条色环表示容量的有效数值，第三条色环表示倍乘，用色标法表示的单位是 pF。例如：图 2-10 所示，第一、二条色环分别是绿色和蓝色，表示有效数值是 5 和 6；第三条色环是黄色，表示倍乘是 10^1 ，则该电容的容量为 56×10^1 pF。有的电容器有一条较宽的色环（其宽度相当于二条色环的宽度）和一条较窄的色环组成，其较宽的色环则表示两个相同的数字。

表 2-5 颜色和容量的关系

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白
数字	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

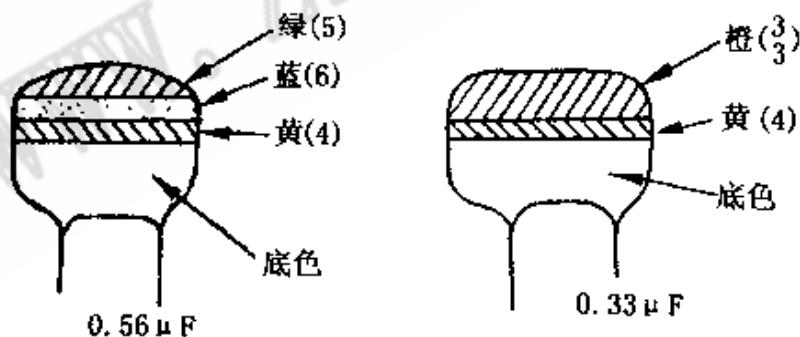


图 2-10 电容器的色标法

电容容量误差的表示方法也有两种。一种是百分比误差表示法。它用 10 个英文字母表示不同的误差，如表 2-6 所示。例如：106J 表示 10×10^6 ($1 \pm 5\%$) pF = 10 ($1 \pm 5\%$) μ F。

表 2-6 字母和误差的关系

字母	D	F	G	J	K	M	N	P	S	Z
误差 (%)	+0.5	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30	± 100	± 50	± 80

4. 电容器的检测

由于普通的万用表是无法检测电容，因此只能通过万用表指针的晃动情况来判断其质量。

对于普通电容，把万用表置于 $R \times 10k\Omega$ 挡，红黑表笔分别接触电容器的两个引脚。如果万用表的指针无晃动，就说明电容已开路；如果指针向右偏移一个角度后，即停住，就说明电容已被击穿短路。正常的电容在检测时，万用表的表针有一个很小的晃动过程。

对于电解电容，由于其容量一般都较大，在测量时应先将其两个引脚相碰，放掉内部存储的电荷，然后用万用表的 $R \times 1k\Omega$ 挡，红黑表笔分别接触电解电容的两个引脚，表针应向右偏移后，再慢慢向左回移（电容的充放电过程），电容的容量越大，其指针向右偏移角度就越大。当表针回移后停在某一个位置时，此时的电阻值即为电解电容的漏电阻，此阻值越大说明电解电容的漏电流就越小。如果表针在检测时偏移不多或偏移后不回移，则说明电容已损坏。

5. 电容器的选用

自己动手制作器材的音响爱好者，都希望作品能够与原装机相媲美。但即使按名机线路完全仿制，往往也达不到原机的音响效果。究其原因，与选择的材料不精有关。因此，在制作时应选择优质恰当的元器件精心制作。在精心选择有源器件的同时，也决不能忽视无源器件（像电容、电阻这样等无源器件），它们对整机音质和音色的影响同样是很大的。在选择电容器时应注意以下几方面：

(1) 选择合适的型号。根据电路要求，一般用于低频耦合、旁路等场合，电气特性相应要求较低，可采用普通电容器等；在高频

电路和高压电路中，应选用云母电容器和瓷介电容器等；在电源滤波和退耦电路中，可选用电解电容器。

(2) 合理选择电容器的精度。在大多数情况下，功率放大器中对于电容器的容量要求并不十分严格。例如在退耦、低频耦合等电路中选用的电容器可比要求值略大即可。但是在振荡回路、延时电路、音调控制等电路中，电容器的容量应尽可能和计算值一致。在各种滤波器以及各种网络中，电容器的数值则要求非常精确，其误差位应小于±(0.3%~0.5%)。

(3) 确定电容器的额定工作电压。当电路工作电压高于电容器额定电压时，电容器就会发生击穿而导致损坏。因此选用时，应选用额定电压高于实际工作电压，并要留有足够的余量。因为电路中常常由于各种原因使电压发生波动造成工作电压升高，从而导致电容带击穿。一般工作电压应低于电容器额定电压的10%~20%左右，对于工作电压较高、稳定性较差的电路可酌情留有更大的余量。

(4) 注意通过电容器的交流电压和电流值。通过电容器的交流电压和电流值，应根据电容器特性规格使用，不能超过额定值。对于有极性的电解电容器，不宜在交流电路中使用。

四、变压器

变压器是利用电磁感应原理而工作的一种元件，在功率放大器中使用最多的是电源变压器，其外形和电路符号如图2-11所示。在初次级绕组的中间有一条虚线，表示初次级绕组之间有一屏蔽层，并将屏蔽层的一端接地，起到抗外界电磁波的干扰作用。

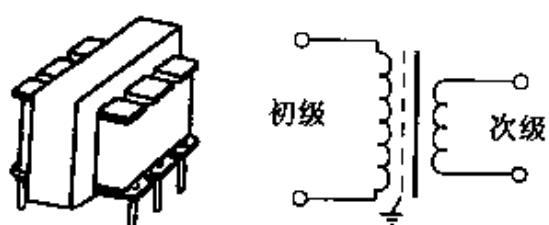


图2-11 变压器的外形及电路符号

1. 变压器的主要特性

(1) 变压比。变压器初级线圈和次级线圈采用适当的比例，可

可以把变压器的输出电压升高或降低，这就是变压器的变压比。它可用下式表示。

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$

需要注意的是，变压器只能将电能从初级转移至次级，使输出的电压升高或降低，但不能增加输出的功率，也就是说变压器次级输出的功率只能小于或等于初级供给的功率。

(2) 隔直流通交流。当变压器的初级线圈通入交流电时，由于其产生的交变磁场，其次级线圈才会产生感生电动势。当变压器的初级线圈通入直流电时，由于其只能产生大小和方向不变的恒定磁场，次级线圈内无磁通变化，故没有感生电动势输出，也就是说变压器不能够通过直流电，即隔直流通交流的作用。

(3) 变压器的损耗。变压器在传递能量的同时会产生损耗，即铜损和铁损。铜损是通电线圈产生焦耳热而引起的损耗，而铁损包括磁滞损耗和涡流损耗二种。

磁滞损耗：当变压器的初级通上交流电后，由于交流电的大小和方向在不断变化，线圈所产生的磁力线的变化会引起变压器铁心内部磁畴的不断相互摩擦，这种摩擦反过来又使磁力线的变化受到阻滞，这种现象称之为磁滞。变压器铁心内部磁畴相互摩擦消耗电能而转变为热能，从而使铁心发热，交流电的频率越高，磁滞就越大，铁心发热也就越厉害。

涡流损耗：涡流是一种感应电流，当变压器的初级加上交流电流后，其铁心就有变化的磁力线通过，因而在与磁力线方向垂直的铁心平面内，就会产生感应电流，此电流即为涡流。变压器的铁心截面越大，所产生的涡流也就越大。涡流在变压器铁心中产生焦耳热，消耗了一定的电能，同时还使铁心发热。

为了减少变压器的磁滞损耗和涡流损耗，这就需要采用含硅量较高的优质硅钢片来制作变压器的铁心。

2. 变压器的检测

变压器的检测主要是检测变压器线圈的电阻值，通过检测出的电阻值来判断变压器的质量。其方法如图 2-12 所示。把万用表置于 $R \times 1\Omega$ 挡，两只表笔分别搭接变压器的初级线圈或次级线圈，此时

检测出的电阻值应当很小，一般为几百欧姆，若检测出的电阻值很大，则说明线圈已出现开路性故障。如果变压器的初级或次级线圈的匝间出现了短路故障，用万用表是检测不出来的。

无论是新绕制的变压器还是刚刚购买的变压器，为了保证各项性能符合指标要求，都需要进行检查测试。首先进行外观检查。外观检查包括能够看得见摸得着的故障，如线圈引线断线、脱焊、绝缘烧焦、机械损伤、表面破损等等。结合外部观察，还可在变压器加电后，用手摸铁心外部，将其温度和正常之温度相比较。如果温度过高，有烫手现象，甚至嗅到焦味，则应进一步检查，并排除此故障。

由于变压器线圈的直流电阻通常很小，特别是导线直径较粗的线圈，因此使用欧姆表测试往往不易发现问题，有条件时应使用直流电桥测试。对于线圈内部发生短路，可通过直流电桥来判断。无直流电桥的音响爱好者也可在变压器绕组的圈内串一灯泡，其电压及灯泡的功率数应根据电源变压器的功率来确定。变压器的功率在 100W 以下的可用 20~40W 的灯泡。接通电源后，将变压器的次级开路，若灯泡微亮，说明变压器内部无短路现象，若灯泡的亮度与正常使用时一样，则说明变压器的内部存在短路故障，需要拆开变压器进行进一步检查。

对变压器还可进行空载电压的测试。给变压器接通电源后，调

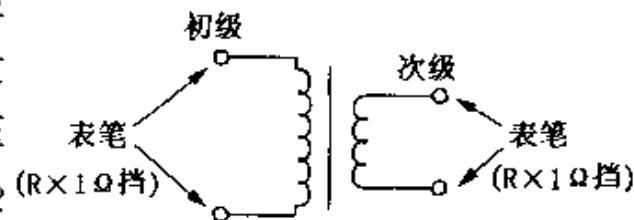


图 2-12 用万用表检测变压器的质量

节其初级电压，使其初级电压与设计值相等，此时检测变压器的次级电压，一般要求电压的误差不大于±5%，具有中心抽头的绕组，其不对称度应小于2%。

另外，变压器还可进行温升的测试。普通小功率变压器允许温升是40℃~50℃，若使用较好的绝缘材料，允许温升达60℃。变压器的温升可按以下方法进行测试，即先用欧姆表（或电桥）测试变压器初级线圈直流电阻值。因为一般初级线圈在变压器的最内层，不易散热，温升最高，所以应测试它的温升。测量方法为：将变压器接上电源，加上额定负荷，数小时后，切断电源，再测量初级线圈直流电阻，如此反复数次，直至所测直流电阻值与上一次测试值相等时，则可认为温度已升至最终温度。此时可用下式求得变压器温升。

$$T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \div 0.0039$$

式中 T 为变压器的温升， R_1 为变压器通电前的直流电阻值， R_2 为接上一定负载后的温度上升至最终温度值时的直流电阻。

3. 变压器的制作

一般来说在音响元件商店均可购买到所需要的变压器，特别是电源变压器。有的音响爱好者从节约的角度出发，自己动手制作变压器。

制作变压器第一步是计算相关的数据，由于较多的文章中已有介绍，这里就不再复述，主要介绍制作的过程。

(1) 制作变压器材料的选择。硅钢片是变压器较为关键的构成器件，有的音响爱好者用旧的硅钢片制作变压器，必须注意尽量清除掉旧硅钢片表面的绝缘漆锈，以免增加变压器的损耗。

硅钢片的表面应平整，同时硅钢片表面应具有良好的绝缘，如绝缘层已脱落或磨损应喷涂绝缘漆。硅钢片的尺寸应准确。将硅钢片的“E”字形和“1”字形片在桌面上放齐，相对排好，两者相对

之处，必须严密无缝。如果相对之处，有的地方具有较大缝隙，就会增加变压器的磁阻。

检查硅钢片的含硅量。一般硅钢片含硅量高，其磁特性就好。但实用中，一般含硅量不超过4.5%。因为含硅量过高，硅钢片即会变脆，机械性能不能满足要求，而磁特性也没有更大的改善。常用的硅钢片含硅量在3%~4%。而用低于此含硅量的硅钢片制作变压器，其损耗较大。一般检查硅钢片含硅量多少可用折弯的方法来辨别，硅钢片含硅量高就越脆。将硅钢片的一角折成直角即折断的，则含硅量接近4%；若反复3~4次才折断的，含硅量约3%；含硅量2%以下的硅钢片很软，像马口铁，不易折断。

漆包线对变压器的性能的优劣也起举足轻重的作用。有的业余爱好者常用旧漆包线绕制变压器线圈。但绕制前应检查漆包线有无脱漆、漆皮有无损伤，以免线圈局部短路。另外，为了减小损耗，通常希望漆包线的电阻尽可能低。最佳的是选用高强度漆包线。质量合格的漆包线来制作变压器。表面应光滑平整，没有裂纹、小气泡和皱纹等毛病，而且整包线颜色应很均匀。

(2) 变压器的制作过程。首先根据选定的铁心和叠厚，确定线圈框的尺寸，以及出线的型式、变压器紧固方式等。然后制作线圈框，可根据确定的尺寸，制作线圈框。应注意线圈框的长度应比窗口长度小2~3mm，宽度和高度应比铁心的宽度和叠厚略大一些，以免安装时过紧。

绕线圈时，将木芯插入线圈框，装到绕线机上，每绕完一层，填一层绝缘纸。绕完初级线圈以后，应缠绕几层绝缘纸，并加一层静电隔离（可用薄铜皮）。需要注意的是用作静电隔离的材料头尾不能相碰，否则会造成短路。在没有薄铜片时，也可用漆包线缠绕一层，并一头引出接地，但不能将头尾相接，以免短路。在屏蔽层外缠几层绝缘纸，然后再绕几层次级线圈。每层和每组之间都必须加以绝缘。

变压器绕制完毕后，还得进行测试，以免因绕制失误而造成返工。检查内容一般有测试线圈的直流电阻、粗略地判断线圈圈数是否正确、线圈有无短路或断路、各绕组间的绝缘电阻等。可用 500V 或 1000V 兆欧表（根据变压器工作条件而定）测定，其数值一般不应小于 $100M\Omega$ （最好大于 $500M\Omega$ ）。若小于 $10M\Omega$ ，则说明其内部受潮；若小于 $1M\Omega$ 时，则可能有漏电的情况存在；若变压器的绝缘电阻近似为零，则视为短路。

当绝缘电阻符合要求后，可插入铁心（为了装卸方便，铁心务必插满，最后留数片不插入）。初级加上电源测试次级各组电压，看其是否与计算值相符，如有较大误差，应检查是否设计有误，或是绕制错误，找到原因后重绕。

经过检测合格的变压器即可进行烘干处理，以便将线圈内的潮气烘干，保持内部干燥。烘烤可以采用烘箱，在 90°C 左右的温度下烘 4~5 个小时，在没有烘箱的条件下，也可将电炉放入金属箱或木箱内，但注意温度要适宜，不可过高，以免将线包烘焦。

经烘干后的线包应立即浸入绝缘漆中，不要在空气中停留时间太长，以免潮气再次侵入，绝缘漆应将线圈线包浸没，待一至数小时后，取出滴干，再放入烘箱内烘干。

最后一道工序即为组装、焊接。经浸漆烘干后的线圈插入铁心，用夹板条夹紧，将引线焊至接线端子，并在各端子旁标明该端子的电压、电流等有关参数，以免使用时误接，这样一个完整的变压器即制作完成。

五、晶体二极管

晶体二极管简称二极管，图 2-13 为二极管的外形及电路符号。

晶体二极管有两个引脚，并有正和负之分，其电路符号箭头表示二极

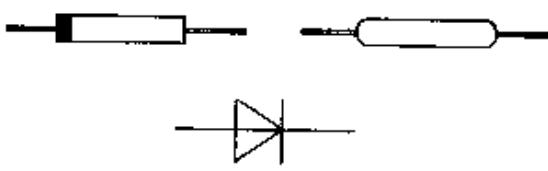


图 2-13 二极管的外形及电路符号

管在工作时，其电流由正端流入，由负端流出。

1. 晶体二极管的型号命名

国内晶体二极管的型号命名方法及含义有关资料介绍较多，这里仅介绍日本及美国对晶体二极管的命名方法（包括三极管），如表 2-7 所示。

表 2-7 国外晶体管的命名方法

日本晶体管的命名方法				
第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
用数字表示电极数	日本电子协会标志	用字母表示使用材料极性和类型	日本电子协会登记号	同一型号改进标志
0：表示光电二极管或三极管及包括上述器件的组件。 1：表示二极管。 2：表示三极管或具有三个电极的其他器件。 3：具有四个有效电极的器件。 $n-1$ ：表示具有 n 个有效电极的器件	S：表示已在日本电子工业协会（JEIA）注册登记的半导体器件	A：PNP 高频管 B：PNP 低频管 C：NPN 高频管 D：NPN 低频管 F：P 控制极可控硅 G：N 控制极可控硅 H：N 基极单结晶体管 J：P 沟道场效应管 K：N 沟道场效应管 M：双向可控硅	一般用多位数字表示，不同的器件各有不同数字登记号	A、B、C…表示此器件是原型号的改进产品

美国晶体管的命名方法				
第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
用型号表示器件类型	用数字表示 PN 结的数目	美国电子协会注册（EIA）标志	美国电子协会登记号	用字母表示器件的分挡

续表

第一部分	第二部分	第三部分	第四部分	第五部分
JAN 或 J: 军用品。无标志则表示非军用品	1: 表示二极管 2: 表示三极管 3: 表示三个PN结器件 n : 表示有 n 个PN结的器件	用“N”表示该器件已在美国电子协会注册	用多位数字表示该器件在美国电子协会的登记号	A、B、C、D… G 表示同一型号器件的不同分挡

2. 晶体二极管的主要特性

(1) 单向导电性。当给二极管的正端加上正向偏置电压时, 电流可从晶体二极管的正向流入, 再从负端流出。当给二极管加上反向偏置电压时, 二极管中便无电流流出, 这一现象被称为晶体二极管的单向导电性。

晶体二极管的单向导电性相当于一个开关, 当其正极的工作电压大于负极时, 晶体二极管便导通, 相当于开关接通, 当其负极的工作电压大于正极的工作电压时, 晶体二极管则截止, 相当于开关关闭。

(2) V-A 特性。它表示了晶体二极管的正负极工作电压与流过二极管的电流的关系, 如图 2-14 所示。当加在正极的工作电压小于 V_1 时, 其从正极流向负极的工作电流很小, 说明晶体二极管没有导通。当加在正极的工作电压大于 V_1 时, 此时工作电压虽然增加很小, 但其正向工作电流急骤上升, 说明晶体二极管处于导通状态。当加在晶体二极管负极的反向工作电压小于 V_2 时, 晶体二极管的反向工作电流很小, 说明晶体二极管处于截止状态。当加在晶体二极管负极的反向工作

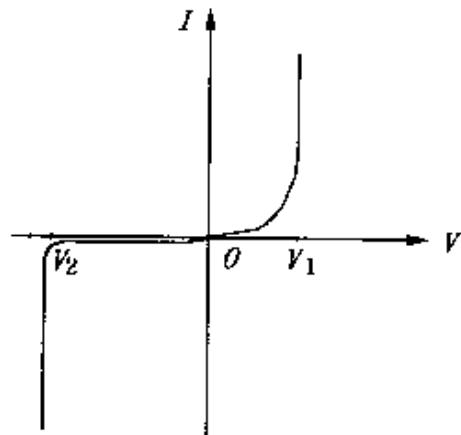


图 2-14 二极管 V-A 特性曲线

电压增加至大于 V_z 时，晶体二极管的反向工作电流急骤上升，破坏了晶体二极管的单向导电特性，此时若再继续增加晶体二极管的反向工作电压，或使晶体二极管长期处于较高的反向工作电压的状态，晶体二极管将会被击穿失去其单向导电特性而损坏。

(3) 管压降。晶体二极管导通后，其正、负极之间的电压称为管压降，不同材料的晶体管的管压降不同，硅晶体二极管的管压降为 0.6~0.7V 左右，锗晶体二极管的管压降为 0.2V 左右。

3. 晶体二极管的主要参数

(1) 最大整流电流。它是指晶体二极管在长期工作状态下，允许通过的最大正向工作电流值。在放大器的电源整流电路中使用的晶体二极管，这一参数较为重要，在一些大功率的整流电路中，均采用加装散热片的方法，给晶体二极管散热，以免晶体二极管因为工作电流通过时发热而损坏。

(2) 反向电流。它是指晶体二极管加上规定的反向偏置电压时，通过晶体二极管的电流。反向电流表示了晶体二极管的单向导电性的优劣，反向电流越小则说明晶体二极管的单向导电特性越好。

4. 晶体二极管的检测

对于晶体二极管，一般只能通过判断正负极和检测其正反向的电阻值来判断其好坏，检测方法如图 2-15 所示。

在判断晶体二极管的正负极时，将万用表的挡位置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，检测一次晶体二极管的两个引脚间的电阻，然后将红黑表笔互换后再检测一次，在检测得到的电阻值很小的一次，黑表笔所搭接的引脚为晶体二极管的正极，红表笔所搭接的引脚为晶体二极管的负极。

在检测晶体二极管的好坏时，同样将万用表的挡位置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，一般锗晶体二极管的正向电阻为 $100\Omega \sim 1k\Omega$ ，其反向电阻

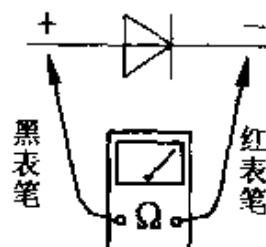


图 2-15 用万用表检测二极管的质量

值为几百千欧，硅晶体二极管的正向电阻值为几百欧至几千欧，反向电阻值为几百千欧。正向电阻值越小越好，反向电阻值越大越好。

六、稳压二极管

稳压二极管也是二极管的一种，图 2-16 为稳压二极管的电路符号及其 V-A 特性曲线。

稳压二极管与普通二极管一样有正负极之分。从图中的 V-A 特性我们可以看出，它与普通二极管相比，只是在反向击穿区与普通二极管不同。稳压二极管是利用了二极管的反向特性，在反向击穿区电流变化很大，而电压变化很小，这说明其具有稳定电压的作用。

普通二极管在反向击穿后会损坏，稳压二极管由于制造时与普通二极管在工艺上有所不同，故在反向击穿电流和电压不超过稳压二极管的最大允许范围，稳压二极管便不会损坏，因此稳压二极管具有稳压作用。

1. 稳压二极管的主要参数

(1) 稳压值。它是指稳压二极管在正常工作时，其引脚两端所稳定的电压值。一般稳压二极管所给出的稳压值有范围，如：“6~7.5V”。但某只具体稳压二极管所稳定的工作电压是固定的。

(2) 最大稳定电流。它是指稳压二极管长期工作而不损坏所允许通过的最大工作电流，但在稳压二极管的实际工作过程中，其工作电流是小于最大稳定电流的。

(3) 最大允许耗散功率。它是指稳压二极管反向击穿时，稳压二极管本身允许消耗功率的最大值。在使用过程中如果超过其最大

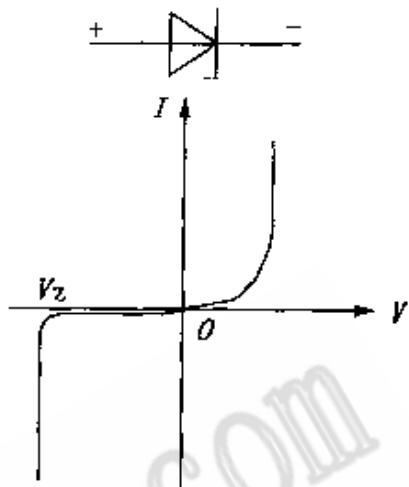


图 2-16 稳压二极管的电路符号
及其 V-A 特性曲线

允许耗散功率，稳压二极管则损坏。

2. 稳压二极管的检测

(1) 判别稳压二极管的正负极。将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，红、黑表笔分别搭接稳压二极管的两个引脚，测得一个电阻值后，红、黑表笔互换再检测一次，比较两次所检测的电阻值，在阻值较小的一次，黑表笔所搭接的引脚便是稳压二极管的正极，红表笔所搭接的引脚则是稳压二极管的负极。

(2) 判别稳压二极管的质量。用万用表的 $R \times 1k\Omega$ 挡检测稳压二极管的正反向电阻，不应该出现开路或短路现象。对于一些稳压值较低的稳压二极管，可用万用表的黑表笔搭其负极，红表笔搭接其正极，测得一个较大的阻值。然后将万用表置于 $R \times 10k\Omega$ 挡，此时所检测到的电阻值会下降许多，即说明稳压二极管已处于击穿稳压状态，反之则说稳压二极管已损坏。这一检测方法是利用万用表内的电池电压使稳压二极管处于反向击穿状态，故其内阻下降许多。

七、晶体三极管

晶体三极管又称三极管，在功率放大器中依靠它对信号进行放大。其外形及电路符号如图 2-17 所示。

晶体三极管的种类较多，按照其材料划分，可分为硅晶体三极管和锗晶体三极管；按照极性划分，可分为 PNP 管和 NPN 管；按照其用途不同划分，可分为普通管（用于一般放大电路）、低噪高放管（用于放大电路，在小电流的工作状态下有较大的放大倍数）、功率放大管（用于对信号进行功率放大，可分为小功率管、中功率管和大功率管）、高频管（用于高频电路）、开关管（用于电子电路起开关作用）等等。

1. 晶体三极管的主要特性

(1) 晶体三极管的放大条件。要使晶体三极管工作于放大状态，必须给晶体三极管的各个电极加上合适的工作电压，即：发射结加

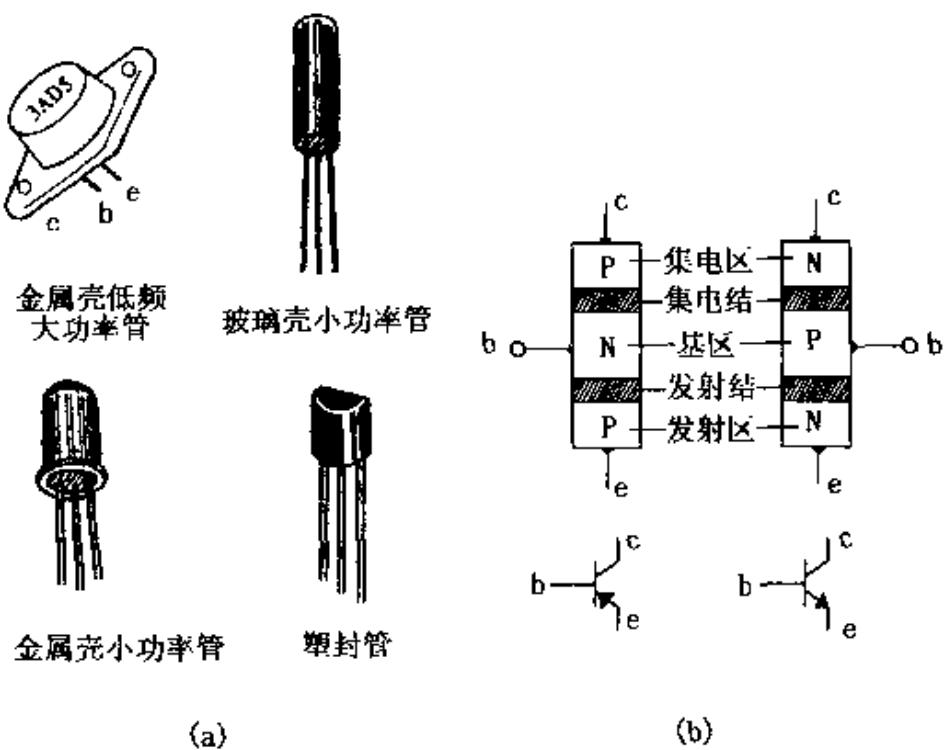


图 2-17 晶体三极管的外形及电路符号

上正向偏置，同时给它的集电结加上反向偏置，并且正、反向偏置电压须合适，才能使晶体三极管工作于良好的放大状态。

由于晶体管有 PNP 管和 NPN 管之分，故晶体三极管 3 个电极所加电压的方法也不同，如图 2-18 所示。

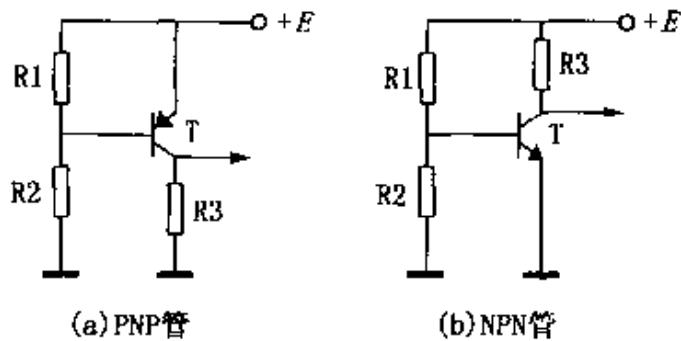


图 2-18 晶体三极管的偏置电路

(2) 晶体三极管 I_B 、 I_C 和 I_E 的关系。晶体三极管的基极电流、

集电极电流和发射极电流无论在正极性和负极性供电的状况下均符合下式公式，即

$$I_C = \beta I_B \quad (\beta \text{ 为晶体三极管的放大倍数, } \beta \geq 1)$$

(3) 晶体三极管的三种工作状态。放大状态是晶体三极管最常用的状态，基极电流的变化会引起集电极电流的变化，即 $I_C = \beta I_B$ ，晶体管在放大状态下， I_B 增大或减小，而 β 不变。饱和状态是当晶体三极管的 I_B 很大时， I_C 几乎不再增大，此时管子的集电结和发射结均为正向偏置。截止状态是当 $I_B = 0$, $I_C = 0$ ，管子的发射结和集电结均为反向偏置。

2. 晶体三极管的主要参数

(1) 电流放大系数。共射直流放大倍数是指三极管接成共发射极电路时，在静态时集电极电流（输出电流）与基极电流（输入电流）的比值。共射交流电流放大倍数是指三极管工作在动态时，基极电流的变化量所引起的集电极电流的变化量。此两个电流放大倍数的含义显然是不同的。

(2) 极间反向电流。它是指三极管发射极开路时，集电极与基极间的反向饱和电流。小功率的硅管一般极间反向电流小于 $1\mu A$ ，而锗管的极间反向电流一般为 $10\mu A$ 。由于三极管的极间反向电流受温度的影响较大，因此在选用晶体三极管时最好选择极间反向电流较小的管子。

(3) 极限参数。集电极的最大允许电流是指三极管的集电极电流超过一定值时，三极管的放大能力下降，当管子的放大能力下降至三分之二时的集电极电流。因此在实际使用晶体三极管时，三极管的集电极最大允许电流超过一定值时，三极管并不会损坏，只是放大能力有所下降。

集—基反向击穿电压是指管子的基极开路时，加于集电极与发射极之间的反向击穿电压，其数值一般为几十伏至几百伏以上。当温度上升时，其集—基反向击穿电压将会下降，因此在选择晶体三

极管时，其集—基反向击穿电压要大于工作电压的两倍。

射—基反向击穿电压是指管子的集电极开路时，在发射极—基极之间允许施加的最高反向电压，其数值一般为几伏至几十伏。

3. 晶体三极管的识别及检测

晶体三极管有三个电极，在使用时须知道哪个引脚是基极，哪个引脚是集电极和发射极。封装形式不同的晶体三极管，其引脚的分布方式也不同。图 2-19 为几种不同封装晶体三极管引脚的识别方法。图 (a)、(b)、(c) 均为小功率晶体三极管，图 (d) 为功率放大器中常见的工作于末级放大的大功率晶体三极管，在其管壳有二个安装孔，用于固定散热片。

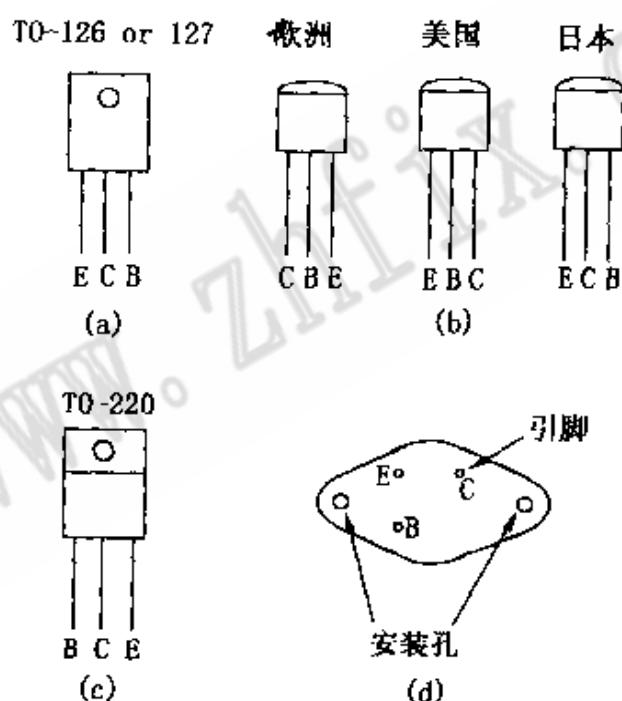


图 2-19 晶体三极管的引脚识别

在使用晶体三极管时，只要其外形与图中的封装形式相同，一般无需检测就可判断出基极、集电极和发射极的位置。

用万用表检测晶体管的方法如图 2-20 所示，主要有以下几项：

(1) 基极的判别。晶体三极管可以看成是两个二极管的组合，将

万用表置于 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡，将红表笔搭接晶体三极管的其中一脚，将黑表笔搭接另外两个引脚，测量出两个电阻值，如果两个电阻值均较小，红表笔所搭接的管脚则为 PNP 型晶体三极管的基极。如果测得两个电阻值其中有一个较大，将红表笔换搭一管脚再测，直至检测到两管脚的电阻值均为较小为止。反之，测得的两个电阻值均较大，则红表笔所搭接的引脚即为 NPN 型晶体三极管的基极。

如果用黑表笔搭接晶体三极管的其中的一引脚，红表笔去搭接另外两个引脚，则结果与上述相反，即测得的两个阻值均为较小时，黑表笔所搭接的引脚则为 NPN 型晶体三极管的基极。如果测得的两个电阻均较大，则黑表笔所搭接的引脚为 PNP 型晶体三极管的基极。

(2) 集电极的判别。判别晶体三极管的集电极可利用晶体三极管的正向电流放大系数比反向电流放大系数大的原理来进行。将万用表置于 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡，用嘴含住已判断出的晶体三极管的基极，用万用表的两个表笔分别搭接晶体三极管的另外两个引脚，利用人体电阻给晶体管实现偏置。测量万用表的电阻值或指针所摆动的角度，然后调换两表笔用同样的方法再测出电阻值或指针所摆动的角度。对两次检测的结果进行比较，对于 PNP 型晶体三极管而言，电阻值较小（指针摆动角度较大）的一次，红表笔所搭接的引脚即为集电极，对于 NPN 型晶体管而言，电阻值较小（指针摆动角度较大）的一次，黑表笔所搭接的引脚即为集电极。

检测出基极和集电极，余下的一个引脚即为发射极了。

(3) 性能和稳定性检测

首先检测穿透电流 I_{ceo} 。用万用表的 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡，检

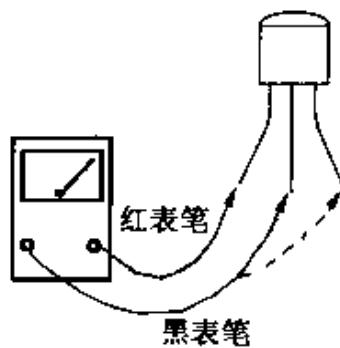


图 2.20 晶体三极管的检测方法

测晶体三极管的集电极-发射极的反向电阻，如果测得电阻值越大，说明 I_{ceo} 越小，则晶体三极管的性能越稳定。一般硅晶体三极管所检测到的电阻值比锗管要大一些。

其次检测晶体三极管的共射极放大系数 β 。在基极和集电极之间接入一个 $100k\Omega$ 的电阻，此时测量集电极-发射极反向电阻较小（即万用表的指针摆动的角度较大）。万用表指针摆动的角度越大，说明晶体三极管的 β 值较大，反之则较小。

对于晶体三极管的稳定性检测，可在判断 I_{ceo} 的同时一并进行，用手捏住晶体三极管的外壳，此时晶体三极管受人体温度的影响，集电极-发射极的反向电阻将有所减小，若万用表的指针摆动角度较大，也就是说电阻较快地在减小，则说明晶体管的稳定性较差，反之则佳。

表 2-8 为常见音响功率管的性能参数，供制作者在选择功率管时参考。

表 2-8 常见音响功率管的性能参数

型号	V_{CEO} (V)	I_C (mA)	P_c (mW)	f_T (Hz)
2SA1227	-140	-12A	120W	60M
2SC2987	140	12A	120W	60M
2SA985	-120	1.5A	25W	180M
2SC2275	120	105A	25W	180M
2SA992	-120	-50	500	100M
2SC1875	120	50	500	100M
2SA1016	-120	-50	400	110M
2SC2362	120	50	400	130M
2SA1215	-160	-15A	150W	50M
2SC2921	160	15A	150W	60M
2SA970	-120	-100	300	100M

续表

型号	V_{CEO} (V)	I_c (mA)	P_c (mW)	f_T (Hz)
2SC2240	120	100	300	100M
2SA1301	-160	-12A	120W	30M
2SC3280	160	12A	120W	30M
2SA1145	-150	-50	800	200M
2SC2705	150	50	800	200M
2SA1349	80	-100	100	170M
2SC3381	80	100	100	170M
2SA1265	-140	10A	100W	30M
2SC3182	140	10A	100W	30M
2SB817	-160	-12A	100W	15M
2SD1047	160	12A	100W	15M
2SB716	-120	-50	750	350M
2SD756	120	50	750	150M
2SA872	120	50	300	200
2SC1775	-120	-50	-300	200
GT20D201	250	20	200W	
GT20D101	250	-20	200W	
2SA1930	180	2A	25W	200
2SC5171	180	2A	25W	200
2SC5359	230	15A	180W	30
2SA1987	-230	15A	180W	30
2SC1837	-180	-2A	20W	200
2SC4793	180	2A	20W	200
2SA1208	-180	-100	1W	200
2SC2901	180	100	1W	200

续表

型号	V_{ceo} (V)	I_c (mA)	P_c (mW)	f_T (Hz)
2SA1492	-200	-10A	120W	30
2SC3856	200	10A	120W	30
2SA1295	-230	-17A	200W	50
2SC3264	230	17A	200W	50
2SB648	-180	50	1W	140
2SD668	180	50	1W	140
2SA1494	-200	-17A	200W	20
2SC3858	200	17A	200W	20
2SA1216	-180	-17A	200W	40
2SC2922	180	1A	200W	40
2SB619	-180	-1.5	15W	140
2SD669	180	1.5	15W	140
MJE15030	160	8A	50W	30
MJE15031	160	8A	50W	30
MJE243	120	4A	15W	40
MJE253	120	4A	15W	40
MJE15024	100	16A	250W	4
MJE15025	400	16A	250W	4
BC550	50	500	500	150
BC560	50	500	500	150
2SA1943	-230	15A	150W	30
2SC5200	230	15A	150W	30
2SB716	-120	-50	750	150
2SD756	120	50	750	350
2SA1191	-120	-100	100	310

续表

型号	V_{CEO} (V)	I_c (mA)	P_c (mW)	f_t (Hz)
2SC2856	120	100	400	310
2SA1173	-100	10	300	250
2SC2785	100	10	300	250
2SA992	-120	50	0.5W	100
2SC1845	120	50	0.5W	100
2SA1360	150	50	5W	200
2SC3423	150	50	5W	200
2SA985	150	1.5A	20W	200
2SC2275	150	1.5A	20W	200
2SA970	-120	-100	300	100
2SC2240	120	100	300	100
2SA1145	150	-50	800	200
2SC2705	150	50	800	200
2SA1349	80	-100	400	170
2SC3381	80	100	400	170
2SA1209	180	-140	10W	150M
2SC2911	180	140	10W	150M

八、场效应管

场效应管是利用 PN 结反向偏置而调制沟道电导的电压控制器件。它具有输入电阻高(达 $10^{13\sim 15}\Omega$)、噪声系数小、高频特性好、抗干扰能力强、无二次击穿、高耐压、工作电流大等特点。它主要有结型和绝缘栅型(绝缘栅型又分增强型和耗尽型两种)两种，在音响电路中一般使用较多的是绝缘栅型场效应管。

图 2-21 为绝缘栅型场效应管的结构及电路符号。它由栅极、漏极和源极组成。首先在漏极和源极之间加上电源 E_D ，如果不给栅极加电压，由于源极和漏极之间的 PN 结处于反向电压偏置，因此漏极

的电流很小。此时如果在栅极加上一个相对于源极的正电压，由于栅极和 P 型半导体之间有二氧化硅作绝缘层，栅极和 P 型半导体相当于一只平板电容，栅极上的正电压排斥 P 型半导体中的多数载流子（空穴），并将 P 型半导体中的少数载流子负电荷（电子）吸引至靠近栅极的二氧化硅表面，因此就在漏极和源极之间形成一个 N 型半导体通道，从而使电子从源极流入漏极形成漏极电流。栅极上所加的正电压越大，沟道吸引的电子就越多，沟道的导电能力也就越强，漏极电流越大，因此漏极电流的大小完全受栅极电压的控制，栅极电压较小的就可以使漏极电流出现较大的变化。如果在栅极回路加入一个交变的信号源，栅极电压的大小就受到该信号源的调制，从漏、源回路中可得到一个与该信号源形状一样但已放大的信号了，这就是场效应管的放大作用。

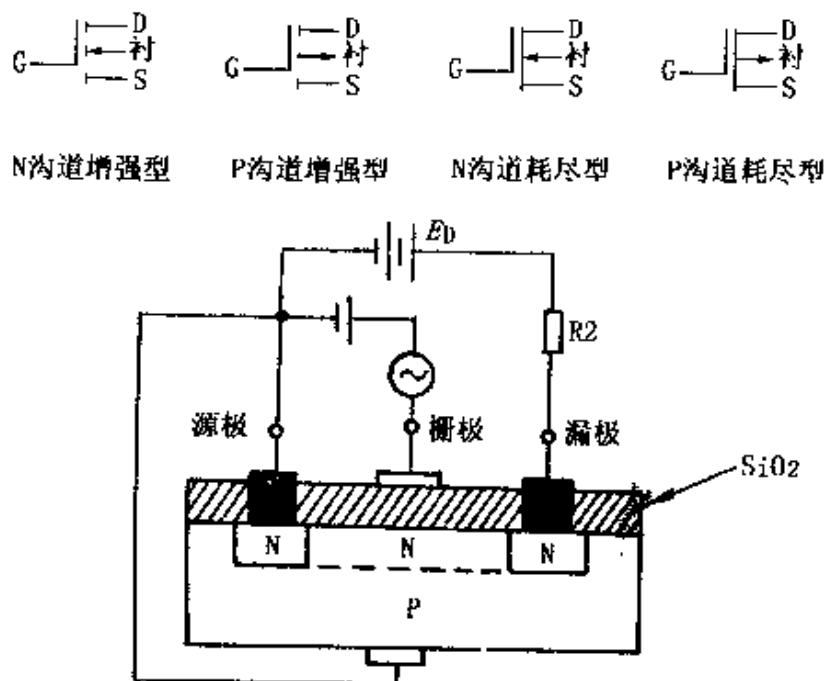


图 2-21 绝缘栅型场效应管的结构及电路符号

1. 场效应管的主要特性

(1) 输入电阻特性。场效应管的栅极与源极之间的 PN 结处于反向偏置状态或绝缘状态，因此栅极电流很小，这使场效应管的输入

电阻很大，一般结型场效应管的输入电阻可达 $10^8\Omega$ 以上，而绝缘栅型场效应管更高。输入电阻大可减轻前级输入放大器及信号源的负载，这是场效应管的优点之一。

(2) 电压控制特性。场效应管与晶体三极管最大的区别就是前者是电压控制器件而后者是电流控制器件，也就是说场效应管是通过改变栅极的工作电压而引起漏极电流的变化而对信号进行放大，而晶体三极管是通过流入管子基极的信号电流的变化，引起集电极电流的变化而对信号进行放大。

(3) 栅极偏置特性。场效应管和晶体三极管一样，均需要给其适当的偏置电压才能使其正常进入状态，即需要给场效应管的栅、源极之间加上一个直流偏置电压。

对于结型场效应管，其栅、源极之间应加反向偏置工作电压。对于绝缘栅型场效应管由于有增强型和耗尽型之分，故二者所加的电压的极性也有所不同。表 2-9 为几种常见的场效应管的偏置电压的供给情况。

表 2-9 几种常见的场效应管的偏置电压的供给情况

场效应管类型	栅极电压极性	漏极电压极性
P 沟道增强型绝缘栅型	-	-
N 沟道增强型绝缘栅型	+	+
N 沟道耗尽型绝缘栅型	+, 0, -	-
N 沟道结型	-	+
P 沟道结型	+	-

2. 场效应管的主要参数

(1) 直流参数。开启电压这一直流参数主要是对于绝缘栅型场效应管而言。所谓开启电压是指漏、源极之间的电压为一定值时，使沟道导通的最小电压值。

栅极击穿电压是指绝缘栅型场效应管的二氧化硅层击穿的电压。

(2) 交流参数。低频跨导是指漏、源极之间的电压一定时，漏极电流的变化量与栅源极电压变化量之比，它表明了场效应管对电压信号的放大能力，此参数与晶体三极管的电流放大倍数相似。

3. 场效应管的选用

在选择场效应管时，其漏极电流应按照电路要求来选择，能满足功耗要求即可，如果一味使用漏极电流较大的管子，会使栅源极电容增大，从而影响电路的频率响应，使重放声变劣。

在选择配对的场效应管时，最好选择同一个厂家，且同批号的管子，这样管子的参数一致性较好。配对管的夹断电压和跨导最好尽量一致，同时有条件的制作者可选择专用音响对管，因为专用音响对管的性能参数更符合对音频信号的放大要求。

场效应管的结构较为特殊，在使用时应注意以下几个方面：

(1) 由于场效应管的输入阻抗较高，其栅极易感应电荷并积累后产生很高的电场，将栅极击穿，因此当管子不使用时必须将管子的所有电极短路。

(2) 在焊接时电烙铁的外壳必须可靠地接地，焊接的顺序应分别为源极、漏极、栅极。

(3) 绝缘栅型场效应管和结型场效应管的源极和漏极是对称的，两极可以互换使用，如果管子的内部已将衬底与源极短接，则源、漏两极不可互换。

(4) 在调整放大电路时，应注意电路的增益不可过高，以免电路工作于较深的正反馈，产生自激而损坏管子。

4. 场效应管的识别及检测

场效应管引脚的识别，可用万用表根据PN结的特点进行检测。比如检测结型场效应管的引脚，首先用红表笔搭接其中的一个引脚，黑表笔分别搭接另两个引脚，记录下测出的两个数值，然后让红表

笔分两次分别搭另两个脚、黑表笔再分别搭另外的两个引脚，这样就得到了三组测量的数值。如果在三组数值中有一组的阻值为无穷大（为N沟道管）或 $5\sim 10k\Omega$ （为P沟道管），就说明红表笔所搭接的引脚为栅极，剩下的两个引脚即为漏、源极，由于漏、源极之间可以互换，因此无需再检测。

对于场效应管质量的检测可在检测引脚时一并进行，如果栅极与漏、源极之间的数值不为无穷大或 $5\sim 10k\Omega$ ，则说明管子已损坏。

表2-10为音响中常见场效应管的性能参数，供制作者参考。

表2-10 音响中常见场效应管的性能参数

型号	构造	沟道	V_{gs} (V)	I_{ds} (mA)	P (mA)	g_m (S)
2SK170	J	N	-50	10	400	22
2SJ74	J	P	50	-10	400	22
2SK246	J	N	-50	10	300	2~6
2SJ103	J	P	50	-10	300	2~6
2SK214	mos	N	160	500	30	20~40
2SJ77	mos	P	-160	-500	30	25~30
2SK1058	mos	N	160	7	100	0.7~1.0
2SJ162	mos	P	-160	-7	100	0.7~1.0
2SK1529	mos	N	200	10A	120	2~4
2SJ200	mos	P	-200	-10A	120	2~4
2SK373	J	N	100	1.6~6	200	1.5~4.6
2SK333	J	N	80	10	0.2	5~15
NPD5564	J	N	55	15	0.5	$\gg 12$
2SK389	J	N	50	10	300	8~22
2SJ109	J	P	-50	-10	300	8~22

九、电子管

1. 电子管的类别

电子管种类繁多，功能各异。从外形上可分为球形管、玻璃管、GT 管、金属管、花生管、微型管等；从结构上可分为二极管、三极管、四极管、束射四极管、五极管、七极管、复合管、高压汞气管、调谐指示管等；从功能上可分为整流管、检波管、混频管、稳压管、振荡管、电压放大管、功率放大管等。

电子管和晶体三极管一样可以对信号进行放大，它主要有二极管和三极管两种，另外还派生出四极管、五极管和束射四极管。其电路符号如图 2-22 所示。

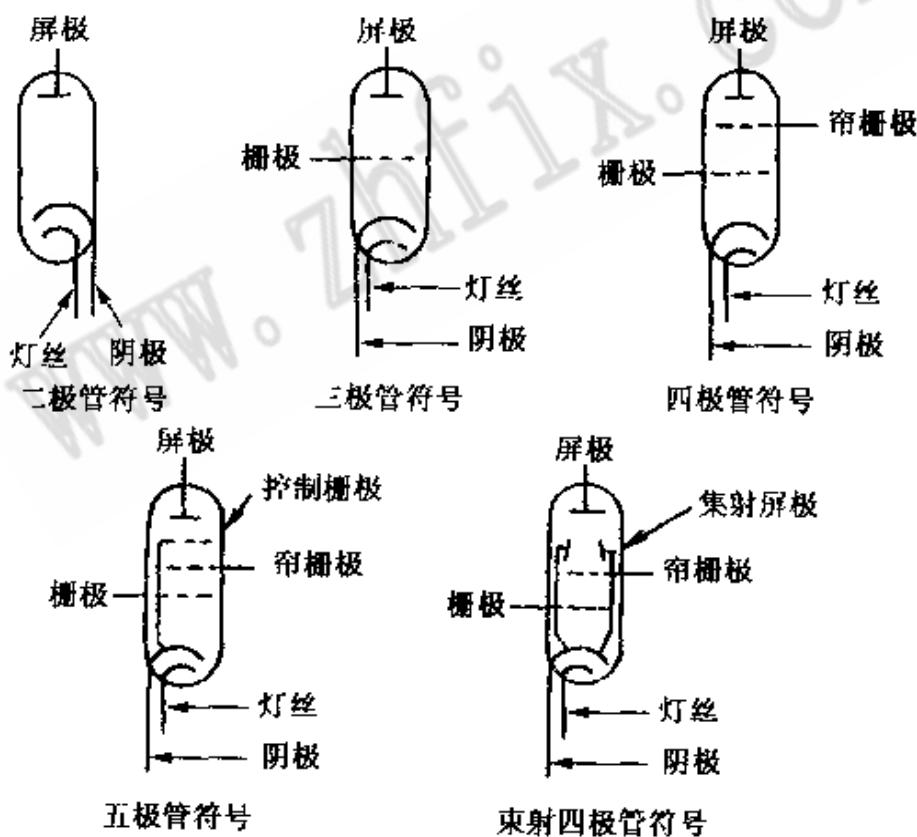


图 2-22 电子管电路符号

(1) 电子二极管。它由屏极(也可叫阳极或板极)和阴极组成，屏极用字母A代表，阴极用字母K代表。图2-23所示为电子管二极管的结构。

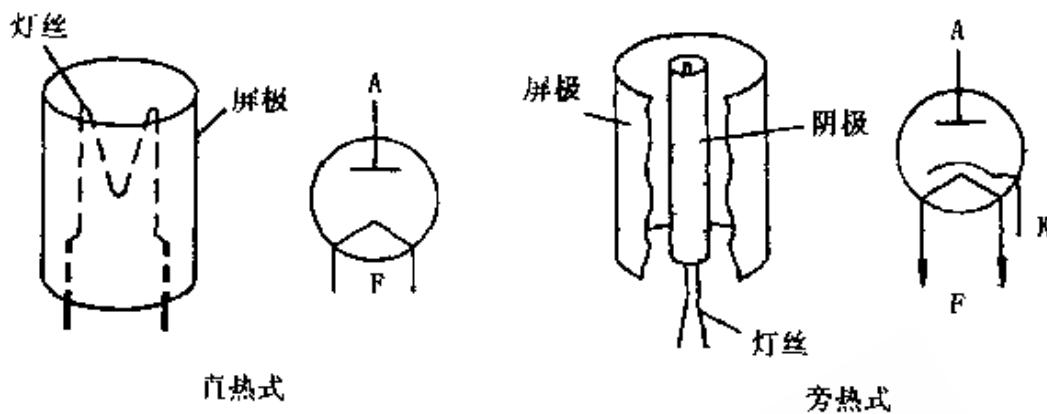


图2-23 电子二极管的结构

阴极为两种，一种为直热式，即将供电电源直接接在阴极上，使阴极发热而发射电子，实际上这种阴极也就是灯丝，故又称之为直热式阴极。另一种为旁热式，它仍是依靠阴极发射电子，不过另外加装了灯丝，通过灯丝给阴极加热后，使阴极发射电子。

(2) 电子三极管。图2-24为电子三极管的结构及放大原理。当灯丝加热后，受热的阴极会发射电子，由于屏极正电场的吸引作用

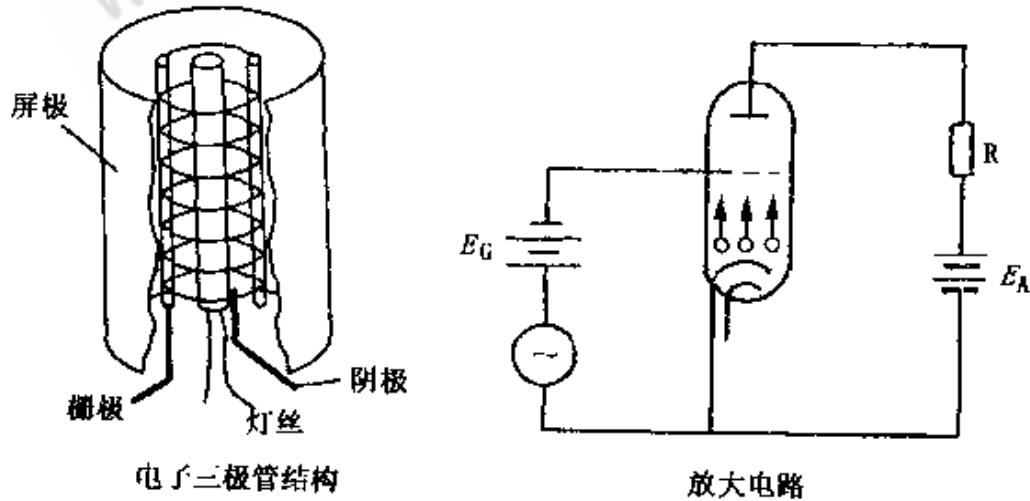


图2-24 电子三极管的结构及放大原理

电子会源源不断地飞向屏极而形成屏极电流，栅极的作用是控制屏极电流的变化。如图中所示，给栅极加上一个不变的负电压，当提高屏极的正电压后，它对电子的吸引力也进一步提高，从而使屏极电流增大。如果在屏极电压不变的情况下，进一步增加栅极的负电压，由于栅极负压的作用，它会排斥电子，阻挡电子向屏极运动，从而减小了屏极电流。如果栅极负压高到一定的程度，则会完全阻断电子向屏极运动，使屏极电流为零。由上可知，改变栅极的负压和屏极的正压都可以控制屏极电流的大小，但是由于栅极距离阴极较近，因此栅极对电子的控制能力要远大于屏极。

如果在电子三极管的栅极上加上一个交变的信号，栅压将随交流信号电压的变化而变化，屏极的电流也随着栅压的变化而变化，屏极电流经过电阻 R 后就可以取出放大后的输出信号，这就是电子三极管的放大作用。

(3) 电子五极管。电子五极管的结构如图 2-25 所示。它比电子三极管多了两个电极，即帘栅极和控制极。帘栅极加在屏极与栅极之间，并使之接地，根据静电屏蔽原理，这样便可消除屏极与栅极之间过渡电容的

不良影响。为使阴极发射的电子能顺利到达屏极，帘栅极应接一个固定的正电压，使之也形成一个正向电场，并通过一个电容使该极的交流信号接地，以达到屏蔽的目的。

实际选用中发现加上帘栅极以后，当屏压增至某一值时，屏流反而随着屏压的增大而减小，而后又随着屏压的增加而增加，这严重影响了电子管的正常工作。原来这是帘栅极电场的加速作用，使电子以更高的速度冲击屏极，把屏极的电子撞击出来，这个现象叫二次电子发射，撞击出来的电子若被帘栅吸收，会使帘栅电流增加，屏流便因此下降。为克服这一缺点，在帘栅极与屏极之间加上一个

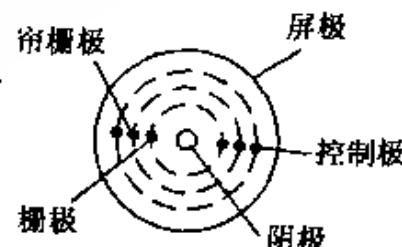


图 2-25 电子五极管

的结构

控制极，就构成了性能优良的五极管。

控制极在电子管内部与阴极相连接，也有的是引出管外再与阴极连接，这样控制极与阴极同电位，比屏极电位要低得多，从屏极撞击出来的二次电子，就会立即被控制极强有力地斥向屏极，从而抑制了二次电子，避免了帘栅极的负面影响。

由于电子五极管的控制极具有屏蔽电场的作用，从而减少了屏极电压变化对屏极电流的影响，因此电子五极管的内阻要大于电子三极管，且电子五极管的放大系数要比三极管大得多。

(4) 束射四极管。束射四极管是比五极管性能更出色的功率放大电子管。如早期的 6P1、6P3 以及近年研制的新品 KT88、KT100 等，在高保真电子管功放中采用这种管子做输出管十分普遍。

束射四极管的结构如图 2-26 所示。它是人们在五极管抑制二次电子发射技术的基础上发展起来的。与五极管不同的是，它没有控制栅极，取而代之的是在帘栅极与屏极间有一对与阴极相连接的金属片，称为集聚电极或束射屏。由于金属片的零电位屏蔽作用，迫使电子聚集成狭扇形向屏极发射并使栅极与帘栅极的栅丝对正，空隙也对正，让电子从对正的各个空隙中射向屏极，这样既可减少电子与帘栅极碰撞的机会，减小帘栅极电流，又可把已聚成束状的电子分割许多薄片，进一步提高密度。聚成束状的电子射向屏极，并在屏极与帘栅极加大了的空间中靠近屏极的地方形成密度较大的负向空间电荷，加上零电位的束射屏，在屏极和帘栅极之间形成抵御屏极发射二次电子的屏障，从而起到五极管抑制栅极的作用，同时，束射管的阴极面积较大，也可发射少量电子，从而提高了放大能力。

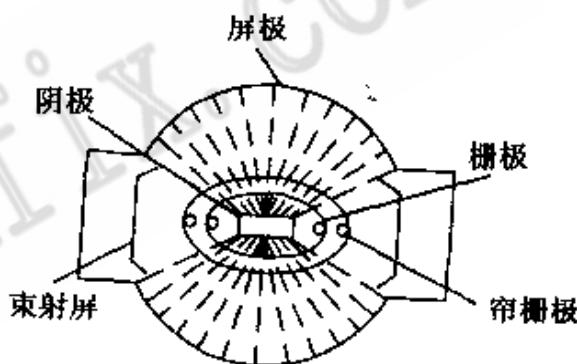


图 2-26 束射四极管的结构

2. 电子管的识别与检测

我国规定的电子管的型号命名方法有两大类。第一类是以数字起首，主要用于收信、放大、调谐指示和小型整流等，型号的第一部分表示灯丝的工作电压，如“6”表示灯丝的工作电压为6V；第二部分用字母表示，如“D”表示二极管，“C”表示三极管；第三部分用数字表示同类型管子的序号及性能；第四部分用字母表示管子的材料和外形，如“P”表示是玻璃外壳的电子管。第二类以字母开头，主要用于射频、稳压、闸流、高压整流等，第一部分用字母表示管子的类别；第二部分用数字表示，区别离子管和光电管同类型管子的序号；第三部分用数字表示同类型管子的序号；第四部分用字母表示管子的外形。

国外对电子管字母表示其结构和用途的方法也有所不同，具体表示方法如表2-11、2-12、2-13所示。

表2-11 常用电子管的字母表示方法

常用管型号第二部分字母含义			
符号	管型	符号	管型
D	二极管	F	三极五极管
H	双二极管	S	四极管
C	三极管	P	功率管（五极或束射）
N	双三极管	K	遥截止五极管或束射功率管
A	双控制栅变频管	J	锐截止五极管或束射功率管
V	二次发射五极管	U	三极、六极（七极、八极）管
G	二极三极管或双二极三极管	E	调谐指示管
B	二极五极管或双二极五极管	Z	小型整流二极管

续表

常用管型号第四部分字母含义			
符号	管型	符号	管型
P	普通玻璃管壳	A	超小型管 ($\phi 7\text{mm}$)
K	金属陶瓷管	R	超小型管 ($\phi \leq 4\text{mm}$)
J	橡实管	S	锁式管
无	花生管 ($\phi 19$ 和 $\phi 22.5\text{mm}$)	D	灯塔管
B	小型管 ($\phi 10$ 和 $\phi 8.5\text{mm}$)		

特殊管型号第一部分字母含义			
F	发射管	WY	稳压管
FD	长短波发射管 ($f \leq 25\text{MHz}$)	WL	稳流管
FU	超短波发射管 ($f = (20 \sim 600)\text{MHz}$)	WF	稳幅管
FC	厘米波发射管 ($f \geq 600\text{MHz}$)	ZQ	充气闸流管
FM	脉冲发射管	ZG	汞气闸流管
T	调制管	ZQM	脉冲充气闸流管
TM	脉冲调制管	Y	引燃管
K	调速管	O	十进位计数管
E	真空高压整流二极管	GD	光电管
EM	真空脉冲整流二极管	GDB	光电倍增管
EQ	充气整流二极管	GDE	光电二极管
EG	汞气整流二极管		

表 2-12 苏式(前苏联)电子管的字母表示方法

管型号第二部分字母含义

符号	管型	符号	管型
凡	二极管	В	二极五极管和双二极五极管
Х	双二极管	И	双三极管
С	三极管	Ф	三极五极管
Д	四极管	Е	调谐指示管
ИИ	功率五极管和束射功率管	ИО	静电偏转式射线管
М	锐截止五极管或束射功率管	ИМ	电磁偏转式射线管
К	遥截止五极管或束射功率管	И	二极整流管
А	双控制栅变频管	ИИ	三极六极管、三极七极管或三极八极管
Г	二极三极管或双二极三极管		

管型号第四部分字母含义

无	金属管	И	小型管
С	普通玻璃管壳	В	超小型管(Φ10毫米)
К	金属陶瓷管	А	超小型管(Φ6毫米)
М	橡实管	И	灯塔管
ДЛ	锁式管		

管型号第一部分字母含义

ГК	长短波发射管($f \leq 25\text{MHz}$)	TX	冷阴极闸流管
ГУ	超短波发射管 [$f = (20 \sim 600)\text{MHz}$]	ГП	充气二极管
ГС	厘米波发射管 ($f \geq 600\text{MHz}$)	ГР	汞气二极管
ГМ	调制管	ИИ	引燃管
В	二极整流管	Ф	光电管
ГИ	脉冲发射管	ФЭУ	光电倍增管
ГГ	充气闸流管	ГМИ	脉冲调制管
ГР	汞气闸流管	СГ	稳压管

表 2 13 欧式常用电子管的字母表示方法

欧式管灯丝电压符号					
符号	灯丝		符号	灯丝	
	电压(V)	电流(A)		电压(V)	电流(A)
A	4(交流)		K	2(直流)	
B		0.18(直流)	M	1.5, 2.4~2.8	
C		0.2(交、直流)	P		0.3(交、直流)
D	1.2~1.4(直流)		U		0.1(交、直流)
E	6.3(交流)		V		0.05(交、直流)
F	12.6		X		0.6
G	5		Y		0.45
H		0.15(交、直流)	Z	冷阴极	

欧式电子管类别符号

符号	管型	符号	管型
A	二极管	T	多种复合管
B	双二极管	W	充气半波整流管
C	三极管(不包括功率三极管)	X	充气全波整流管
D	功率三极管	Y	高真空半波整流管
E	四极管(不包括功率四极管)	Z	高真空全波整流管
F	五极管(不包括功率五极管)	ABC	高频双二极三极管
H	六极或七极管	AF	二极五极管
K	八极管	AC	双二极三极管
L	功率五极管或束射四极管	CH	三极六极管
M	调谐指示管	BF	双二极五极管
N	充气三极或四极管	CC	双三极管
P	二次放射管	CF	三极五极管
Q	九极管	CL	

续表

欧式电子管的外形及序号			
符号	管型	符号	管型
1~9	边接触式管座	61~63	超小型管座
11~19	钢质管座	71~79	自锁式管座
21~26	自锁式管座	80~89	拇指形小九脚管座
31~34	普通八脚管座	90~99	拇指形小七脚管座
40~49	紧锁式管座	100~169	特种管

(1) 常用管的字母表示方法。

(①) 变频、放大、调谐及整流管。

型号的第一部分：一般用整数表示该电子管灯丝的工作电压。如：“5”，表示其灯丝工作电压为5V。

型号的第二部分：用字母表示电子管的结构。如“D”，表示该电子管为二极管。

型号的第三部分：用数字来区别同一类型电子管的序号。

型号的第四部分：用字母表示该电子管外壳的形状或材料。如“P”，表示该电子管为普通玻璃管壳。

(②) 发射、稳压、整流管。

型号的第一部分：用字母表示电子管的类型。如“WY”表示该电子管为稳压管。

型号的第二部分：用数字表示电子管的是光电管还是离子管的序号，部分电子管无第二部分（此表中未列出）。

型号的第三部分：用数字表示电子管的同类型管的序号，部分电子管无第三部分（此表中未列出）。

型号的第四部分：用字母表示电子管的外形。“S”表示水冷管，“F”表示风冷管。

(2) 苏式（前苏联）电子管的字母表示方法。

(1)以数字开头的电子管的字母表示方法。

型号的第一部分：用数字表示电子管灯丝的工作电压。

型号的第二部分：用字母表示电子管的类型，如：“C”表示该电子管为三极管。

型号的第三部分：用数字表示区别同类型电子管的序号（此表中未列出）。

型号的第四部分：用字母表示电子管的外壳的形状或材料。如“C”表示该电子管为普通玻璃管。

(2)以字母开头的电子管的字母表示方法。

型号的第一部分：用表示电子管的类型。如“B”表示该电子管为二极整流管。

型号的第二部分：一般使用符号“—”。

型号的第三部分：用数字表示同类型电子管的序号。

型号的第四部分：用字母表示电子管的冷却方法，“V”表示水冷，“E”表示风冷。

(3)欧式电子管的字母表示方法。

型号的第一部分：用字母表示电子管灯丝的工作电压或工作电流。如“A”表示该电子管灯丝的工作电压为4V（交流）。

型号的第二部分：用字母表示电子管的类别。如“A”表示该电子管为二极管。如果是复合管则用两个以上的字母表示。

型号的第三部分：用数字表示电子管的外形及序号。如数字在“1~9”表示该电子管为边接触式管座。

目前常见的电子管主要有玻璃管和金属管两种，较常使用的是玻璃管。玻璃管体积较大的有：八脚电子管等；体积较小的有小七脚管和小九脚管。电子管最少的引脚为4个，常见的管脚数有4、5、6、7、8、9、11、12、14、20、25等。识别管脚时，管脚向上，从其缺口或凸起部分的左边开始依次为1、2、3…

另外，电子管安装时必须固定在管座上，通过管座与电路相连。

管座一般用瓷料或胶木制作，上面有管子引脚的插孔和与外电路相连接的焊接片。图 2-27 所示为电子管管脚和管座的排列。图 2-28 为常见的电子管引脚功能图。

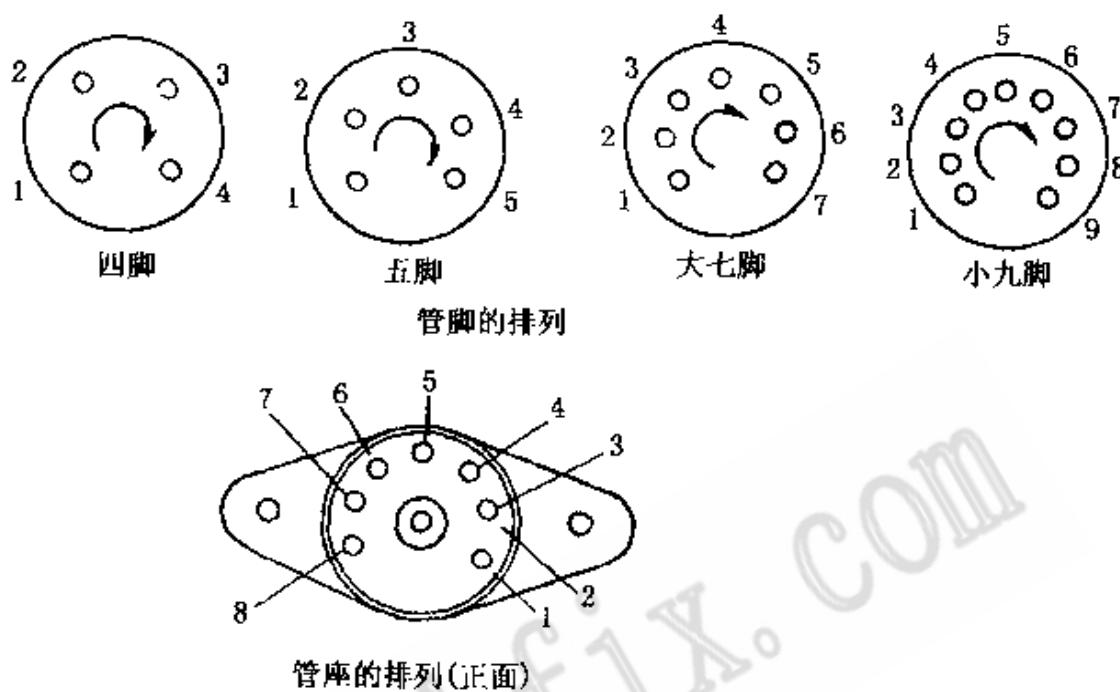
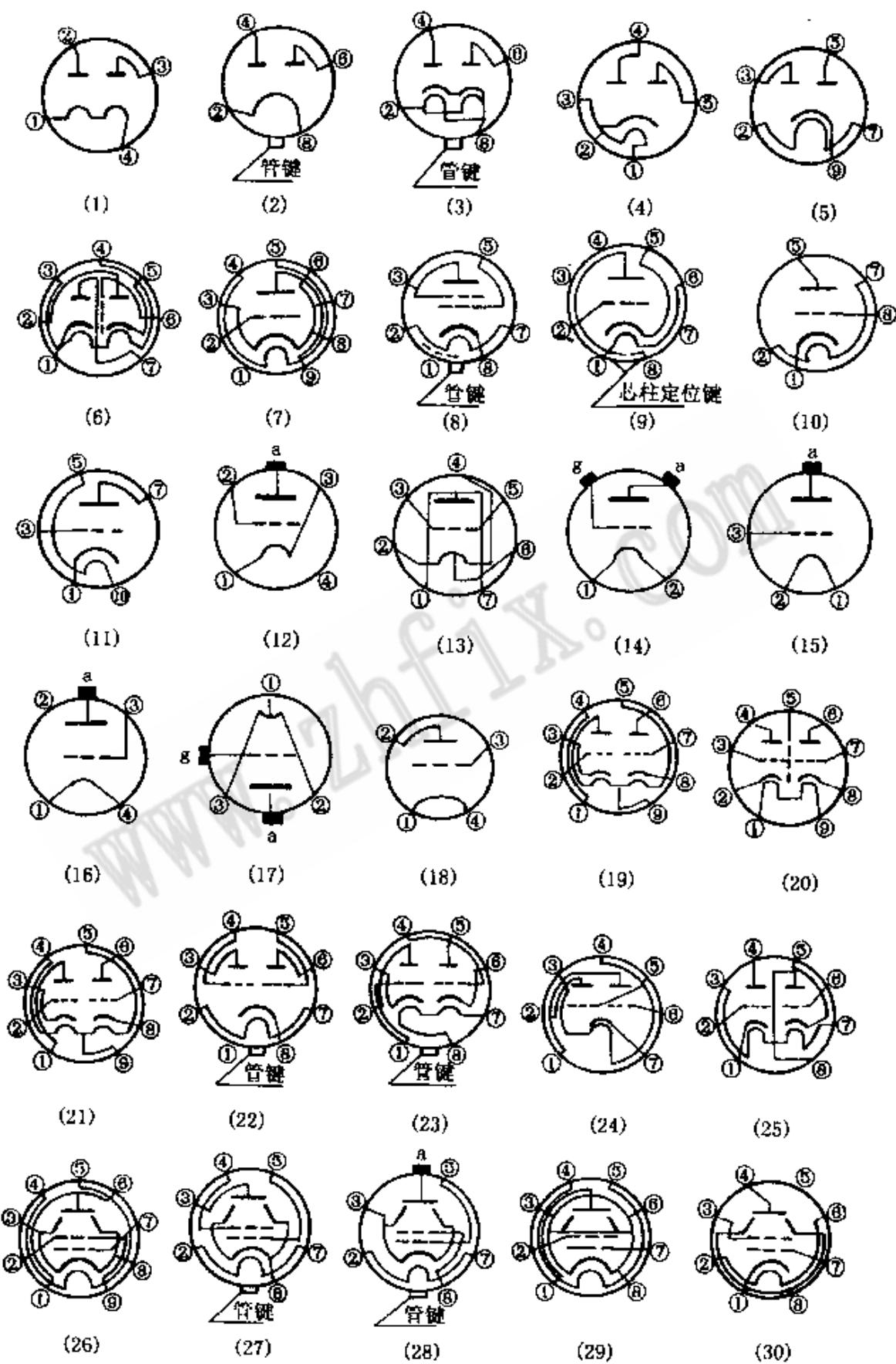


图 2-27 电子管管脚和管座的排列

对于电子管的检测，一般只能检测其灯丝的质量，将万用表置于 $R \times 100\Omega$ 挡，将两表笔搭接于灯丝的两个引脚上，如果检测到的电阻值小，就说明灯丝完好。如果检测到的阻值很大，就说明电子管的灯丝已开路，此电子管已损坏。至于电子管的真空度是否下降（漏气）用万用表是无法检测的，只能在机器上试用来判断。

国内生产电子管放大器较有代表性的有“极典”系列。一般用于前级放大器的管子有 ECF82 (6F2)、6F1、EF86 (6J8)、12AX7 (6N4)、12AU7 (6N10)、6DJ8 (6N11)、6SN7 (6N8P)、6N1、6N2、6N6 等。用于后级放大器的电子管有 KT88、KT90、KT100、EL34、6L6GC、2A3、300B、211 等。电源整流用的管子一般为 5U4G、5Z3P 等。



如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。 65

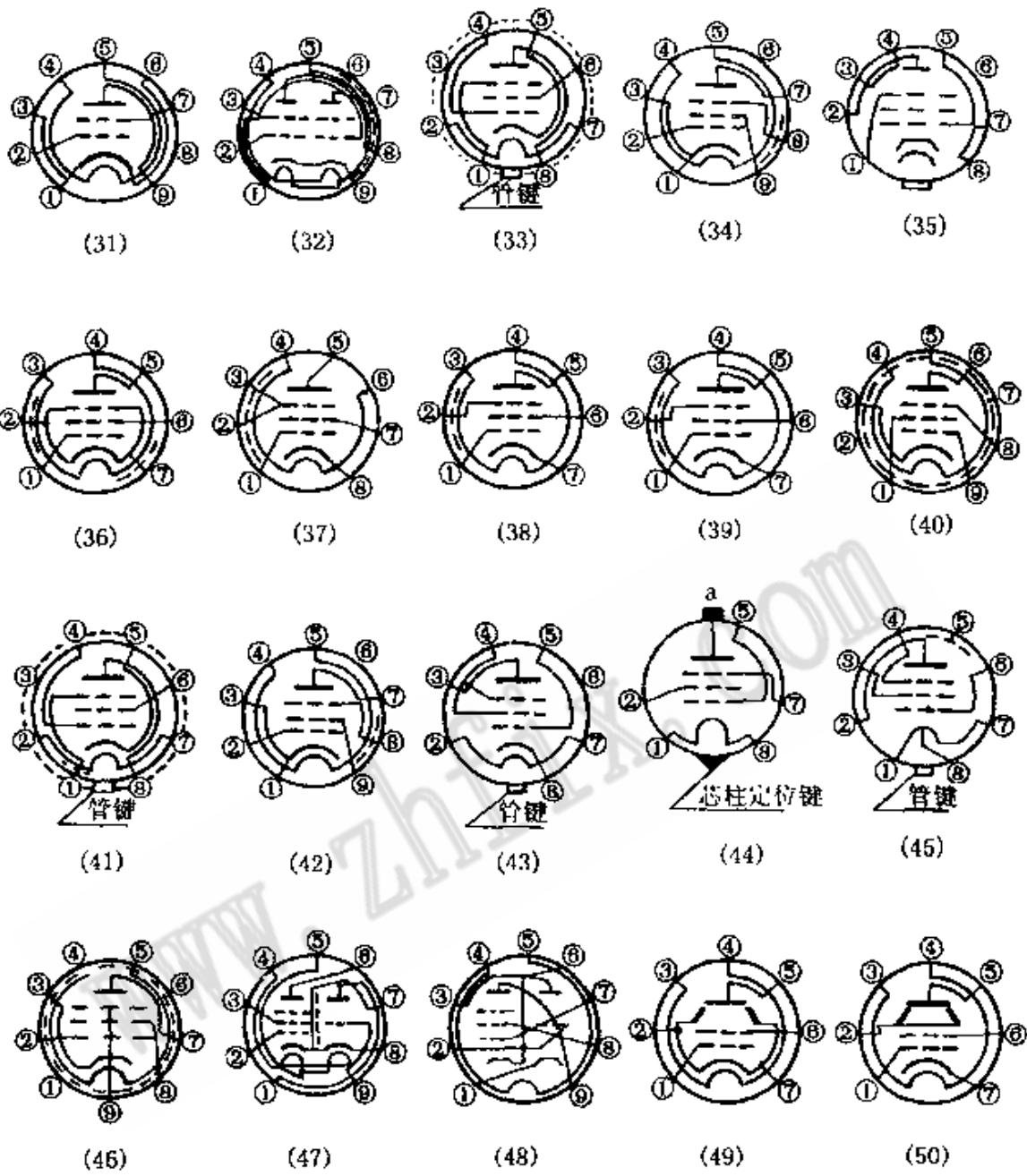


图 2-28 常见电子管引脚功能

表 2-14 为常见国产电子管的参数，表 2-15 为常见进口电子管的参数，供制作者选用电子管时参考。

表 2-14 常见国产电子管的参数

参数类别 电子管 参数名及代 号	典型工作参数										极限运用参数												备注		
	灯丝		阳极		第 一 集 电 压		第 二 集 电 压		第 三 集 电 压		第 四 集 电 压		阴极 限 电 压		阳极 限 电 压		灯丝极 限电压		阳极 最 高 电 压		阴极 最 大 功 率		阳极 功 率		
	U_f	I_f	U_a	I_a	U_{k1}	I_{k1}	U_{k2}	I_{k2}	R_s	C	μ	U_g	I_g	U_s	I_s	P_n	U_{g2}	P_{g2}	P_n	U_{g1}	P_{g1}				
FU-5	10	3~ 3.5	1.5k 1.5k	7.4 7.4	-10					1.5		10.5	9.5	1.5k	12.5									$P_c = 150W$	
FU-31	7.5	5							10	3.3	3.5					1k	50								$P_0 = 95W$
FU-33	10	10 ± 0.8	3k ± 10	100 -50						35+5	10.5	9.5	3.3k	300										$P_0 = 800W$	
6P1	6.3	0.5	250	44±11	-12.5	250	7	40	1.96	7	5.7	250	12	250	2.5									$P_0 = 4W$	
6P3P	6.3	0.9	250	52±14	-14	250	8		6±0.8	7	5.7	400	20.5	330	2.75									$P_0 = 5, 4W$	
6P9P	6.3	0.65	300	30±10	-3	150	6.5	2.5	11.7	7	5.7	330	9	330	15.5	$R_{g\max} = 0.5M\Omega$									

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。

续表

参数类别 电子管 参数名及代 号	典型工作参数								极限运用参数									
	灯丝		阳极		第一 栅压		第二 栅压		帘栅		阳极 最高电压		阳极 最大功 率电 压		帘栅 电压		阳极 最大功 率	
	电压	电流	电压	电流	电压	电流	内阻	互导	放大 系数	灯丝极 限电压	阳极 最大功 率电 压	阳极 最大功 率	阳极 最大功 率电 压	阳极 最大功 率	阳极 最大功 率电 压	阳极 最大功 率		
(V)	(A)	(V)	(mA)	(V)	(V)	(mA)	(kΩ)	(mA, V)	—	(V)	(V)	(W)	(V)	(W)	(V)	(W)		
6P14	6.3	0.76	256	48±8	256	7			9		7	5.7	300	12	300	2	$P_0 > 3\text{W}$	
6P15	6.3	0.76	.00	30±8	150	6.5	100	12		7	5.7	330	12	330	1.5	$R_{G\max} = 1M\Omega$		
FU-17	6.3	0.8	300	22.5	200	6		3.2±1	7	14	5.7	11.4	400	6	250	双束四极管		
FU-25	12.6	0.15	600	36±12	-29	300	4		6±1		14	11.4	600	25	300	3.5		
FU 29	6.3	2.2	250	33~39	-11	175	13				7	5.7	750	40	225	7		
	12.6	1.1		-100							14	11.4			两管 U _{G0} 不同			

表 2-15 常见进口电子管的参数

型号	灯丝		阳极		栅极		内阻 R_g (kΩ)	跨导 G (mA/V)	放大倍数 μ	负载 R_L (kΩ)	输出功率 P_o (W)
	U_f (V)	I_f (mA)	U_a (V)	I_a (mA)	$P_{a\max}$ (W)	U_{g1} (V)	U_{g2} (V)	I_{g2} (mA)			
2A3	2.5	2.5	250	60	单边 推挽	-45	-	-	0.8	5.2	4.2
12AT7	6.3	0.3	250	10	2.5	-2	-	-	10.9	5.5	60
12AU7	同上	同上	250	10.5	2.75	-8.5	-	-	7.7	2.2	17
12AX7	同上	同上	250	1.2	1	-2	-	-	62.5	16	100
12BH7A	6.3	0.6	300	11.5	3.5	-50	-	-	5.3	3.1	16.5
6CG7	6.3	0.365	90	15	1.3	-1.3	-	-	2.6	12.5	33
6B4G	6.3	1	250	60	-	-45	-	-	0.8	5.25	4.2
6240G	6.3	0.6	250	7	3	-5	-	-	-	35	
6267	6.3	0.2	250	3	1	-2	140	0.6	25	2	38
6BQ5	6.3	0.76	250	48~49.5	12	-7.3	250	5.5	38	11.3	19
6L6GC	6.3	0.9	250	72~79	30	-14	250	5~7.3	22.5	6	-
6V6GT	6.3	0.45	250	45~47	14	-12.5	250	4.5~7	50	4.1	-
6550A	6.3	1.6	250	140~150	42	-14	250	12~28	12	11	-
										1.5	12.5

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。

续表

型号	灯丝			阳极			栅极			内阻 R_i (kΩ)	跨导 G (mA/V)	放大倍数 μ	负载 R_L (kΩ)	输出 功率 P_O (W)
	U_f (V)	I_f (mA)	V_A (V)	I_A (mA)	P_{max} (W)	U_{g1} (V)	U_{g2} (V)	I_{g1} (mA)						
7591	6.3	0.8	300	60~75	19	-10	300	8~15	29	10.2	-	3	11	
6W6GT	6.3	1.2	110	49	-	-7.5	110	4~10	13	8	-	2	2.1	
6J5-GT	6.3	0.3	250	9	-	8	-	-	7.7	-	-	-	-	
单管	6.3	1.27	250	85	25	-15	250	6.3	22.5	6.3	9	2.2	7.25	
KT66	同上	同上	同上	115	2×52	-	-	300	2×2.5	1.5	6.15	9	8	30
AB1类	同上	同上	同上	510	2×40	-	-40	395	2×1.5	-	-	-	5	50
三极联接推挽	同上	同上	同上	250	2×55	-	-20	-	-	-	6.15	-	2.5	4.5
KT88	同上	同上	同上	400	2×62.5	-	-38	-	-	-	-	-	4	14.5
单管	6.3	1.6	250	140	-14	250	12	-	11.5	8	1.5	12.5		
KT88	同上	同上	同上	100	87	35	-16.5	22.5	4	12	-	-	3	20
AB1类	同上	同上	同上	521	2×64	-	-	390	2×1.7	-	-	9	50	
三极联接推挽	同上	同上	同上	552	2×60	-	-34	390	2×1.7	-	-	4.5	100	
WEVT52	7	-	220	29	-	-43.5	-	-	1.65	2.3	3.6	3.8	10	
PX25	4	2	400	62.5	-	-34	-	-	1.26	7.5	-	3.2	6	
UV-211	10	3.25	1000	65	75	-52	-	-	3.8	1.2	-	3.5	8.5	-10

3. 电子管的选用

自己动手制作电子管功率放大器，应选择怎样的电子管来制作功放？其主要原则应该是性能优越，放大效率高，适应性强，价格适当。这样对于选择功率放大管来说，首选束射四极管与五极功率电子管，如 6P3P、6L6、EL34、6CA7、KT88 等型号的管子，这些功率电子管不但放大效率高、性能好，而且国内均有生产，价格适中。对于前级放大管来说，应选择双三极电子管来担任，这样可以收到事半功倍的效果。其型号有 6N1、6N2、6N8P、6N9P、6N11、12AU7、12AX7 等，生产厂家有长沙曙光电子管厂、北京电子管厂、南京电子管厂、上海电子管厂等。

在选择末级功放管时，最好选择同一厂家、同一牌号与同一时期的产品，这样其放大性能与效率基本相同。选用过去珍藏的电子管时，必须着重考虑其放大效率的一致性，特别是作推挽放大时，两管放大效率如果相差较大，会导致推挽放大不平衡，从而引起输出的失真。

在选择前置级或倒相推动级电压放大管时，应选择无漏电现象、无微音效应的电子管，因为功放机的放大倍数极高，前级电子管如果存在轻微的漏电或微小的杂声，经多级放大后会相当严重。电子管本身存在的小毛病是无法维修的，只有更换才行。

使用电子管时须注意：

(1) 使用电子管放大器时严禁输出端不接负载，或使负载短路，以免损坏放大管。

(2) 由于电子管是利用热发射原理制造的，因此其内部电极有一定的使用期限，使用的电源应控制在额定工作电压的 5% 以内，以免电压过高或过低而减少电子管的使用寿命。

(3) 部分电子管放大器的电子管是设计成外露式的，因此在机器工作时或机器关机后电子管还有温度时，不可以将水等液体洒到管子上，以免管子爆裂。

(4) 在机器工作时或关机后 20 分钟内不可振动机器，因为电子管的灯丝在热态下较为脆弱，过分的振动容易使灯丝断裂。

(5) 电子管放大器在工作时温度较高应注意机器周围的通风。

十、达林顿管

所谓达林顿管是将两只或者多只 PNP、NPN 型晶体三极管进行复合后形成的，其内部结构如图 2-29 所示。

达林顿管的最大特点是具有较高的放大倍数，晶体三极管复合的数量越多，则放大倍数越高，最高的达林顿管的放大倍数可达几万倍，但放大倍数较高的管子，其功率都较小，一般只有几瓦，且工作时的热稳定性较差。在大功率的达林顿管的内部都设有均衡电阻，目的是提高管子的热稳定性及管子 V_{ce} 的耐压，如图中 R1、R2 所示。

达林顿管一般用于功率放大器的末级输出，其重放声的感觉是：低频量感丰富，但解析度较一般。目前在音响器材中还较少使用达林顿管。

用万用表对普通达林顿管的检测包括识别电极、区分 PNP 和 NPN 类型、估测放大能力等项内容。因为达林顿管的 E-B 极之间包含多个发射结，所以应该使用万用表能提供较高电压的 $R \times 10k$ 挡进行测量。

检测大功率达林顿管的方法与检测普通达林顿管基本相同。但由于大功率达林顿管内部设置了 V3、R1、R2 等保护和泄放漏电流元件，所以在检测时应将这些元件对测量数据的影响加以区分，以免造成误判。具体可按下列几个步骤进行：

(1) 用万用表 $R \times 10k$ 挡测量 B、C 之间 PN 结电阻值，应明显

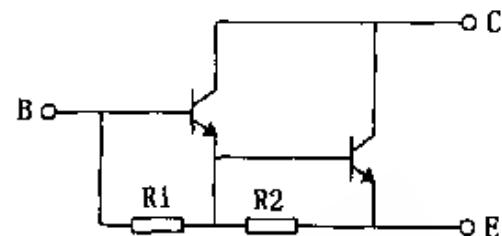


图 2-29 达林顿管内部结构

测出具有单向导电性能。正、反向电阻值应有较大差异。

(2) 在大功率达林顿管 B-E 之间有两个 PN 结，并且接有电阻 R₁ 和 R₂。用万用表电阻挡检测时，当正向测量时，测到的阻值是 B-E 结正向电阻与 R₁、R₂ 阻值并联的结果；当反向测量时，发射结截止，测出的则是 (R₁+R₂) 电阻之和，大约为几百欧，且阻值固定，不随电阻挡位的变换而改变。但需要注意的是，有些大功率达林顿管在 R₁、R₂ 上还并有二极管，此时所测得的则不是 (R₁+R₂) 之和，而是 (R₁+R₂) 与两只二极管正向电阻之和的并联电阻值。

十一、集成电路

集成电路按照结构和制造工艺不同可分为厚膜集成电路、半导体集成电路和混合集成电路；按照使用功能可分为数字集成电路和模拟集成电路。在音响设备中使用最多的是模拟集成电路，而模拟集成电路又可分很多类，如：集成运算放大电路、集成功率放大器、集成稳压电源、集成前置放大器。

1. 集成电路的特点

(1) 集成电路内部的各级放大器之间一般采用直接耦合的方式，这样制作时较为方便、简单，但同时也出现了一些问题，无论是晶体管或场效应管作为放大器，当环境温度发生了变化，其技术参数同时也会发生变化，如果在级与级放大器之间加入了耦合电容或变压器，则温度变化而产生的参数变化只会局限于某一级，放大器与放大器的级与级之间不会产生相互的影响。为了克服这一缺点，在集成电路中采用了差动放大器、电平移动电路及互补电路等手段，使集成电路在工作时性能稳定。

(2) 集成电路内不能制作大容量电容和大阻值电阻

由于集成电路的体积较小，因此不可能在很小的硅片上制作容量较大的电容和阻值较大的电阻，如果电路需要较大容量的电容及

较大阻值的电阻，则需要在集成电路的外电路加接。

(3) 集成电路内无晶体二极管

由于集成电路内部制作晶体三极管的工艺比制作晶体二极管的工艺更为简单，因此利用集成电路内部的晶体三极管的发射结或集电结来代替晶体二极管。

2. 集成电路的识别

音响集成电路的封装形式主要有单列、双列及塑料封装和金属封装四种，在数字音响器材中的集成电路一般都是采用了表面安装技术。各种集成电路的引脚序号的标注也有所不同，图 2-30 为常见的音响集成电路引脚序号的标志和顺序。

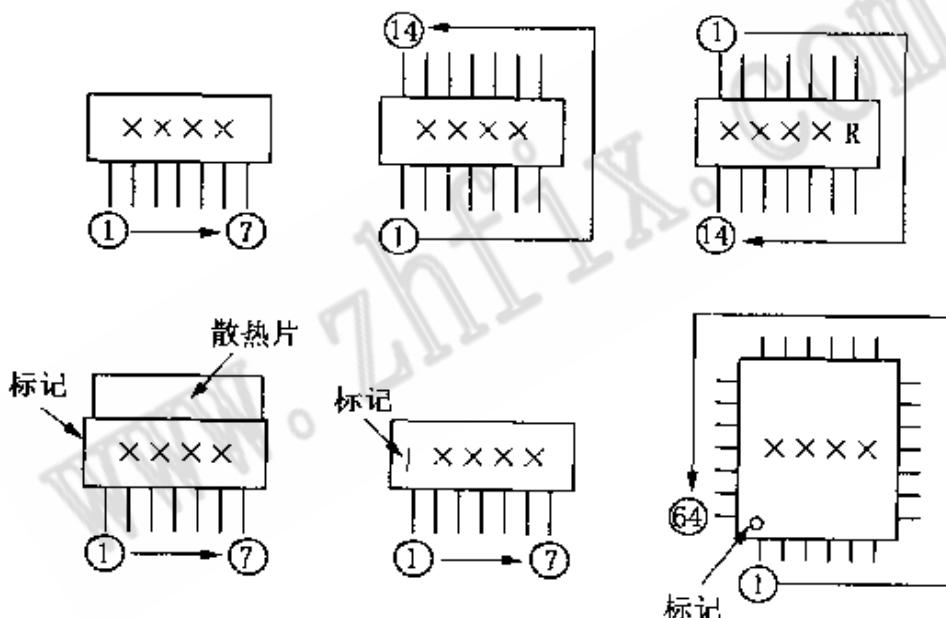


图 2-30 常见集成电路引脚序号的标志和顺序

必须注意的是，有的音响集成电路的型号后面标注有英文字母“R”，它表示和不带“R”的集成电路的引脚序号相反，比如：LA5661 为单列集成电路，其引脚排列为从左至右 1~7 脚，而 LA5661R 也为单列集成电路，其引脚排列和 LA5661 相反，从右至左为 1~7 脚。

在更换音响集成电路时，新的集成电路应与原集成电路的型号一样，如果无原型号集成电路，只要集成电路的型号字母后面的数

字及后面的字母相同即可互换，比如：集成电路“HA××××P”，只要集成电路的后面部分“××××P”相同即可互换。在没有办法进行代换集成电路时，可以查阅集成电路的内电路的资料，如果是内部部分电路损坏，可以通过外接电路的方法进行应急代用，但不适宜大面积电路的代用，因为这样往往会使电路改动较大。

对于集成电路的英文标注，各国都有各自的特点，比较容易混淆。国外生产的音响集成电路一般由三部分组成，第一部分表示了生产该集成电路公司的代号或集成电路的种类，第二部分表示了集成电路系列号或功能序列号，第三部分表示了集成电路的封装形式。

(1) 日本日立公司。它生产的音响集成路由六部分组成。

第一部分是“H”，表示是日立公司的产品。

第二部分（在“H”后面）用不同的字母代表不同功能的集成电路，“A”表示模拟线性集成电路；“D”表示数字集成电路；“M”表示RAM集成电路；“N”表示ROM集成电路。

第三部分用两位数表示，代表仿制产品的序号。“11~12”表示用于高频电路；“13~14”表示用于声频电路；“17”表示用于工业。

第四部分表示电路的序号，第五部分表示改进型。第六部分表示了集成电路的封装形式。“NT”表示缩型双列直插封装；“W”表示四列扁平封装；“F”表示双列扁平封装；“R”表示引脚为相反顺序排列；“C”表示陶瓷封装；“P”表示塑料封装。例如：HA12037NT，“HA”表示为日立公司生产的模拟线性集成电路；“12”表示用于高频电路；“037”表示电路序号；“NT”表示为缩型双列直插封装。

(2) 日本三洋公司。它生产的集成电路是以字母“L”为代号，只有三个部分。

第一部分“L”表示三洋公司。

第二部分表示电路的种类。“LA”表示是双极线性集成电路；“LB”表示是双极数字集成电路；“LC”表示是CMOS集成电路；“LD”表示是薄膜集成电路；“STK”表示是厚膜集成电路；“STR”

表示是厚膜电源保护集成电路。

第三部分表示电路序号。一般用四位数字表示，前两位数字表示电路的功能，后两位数字则表示了电路的序号。前两位数字中“12”表示是高频放大电路；“32”表示是前置放大集成电路；“33”表示调频解调集成电路；“41”及“49”是功率放大集成电路。例如：LA3220，表示三洋公司生产的双极线性集成电路，电路的功能为前置放大集成电路。

(3) 日本松下公司。它生产的集成电路型号的表示，只有字母(两位)及数字(四位)两部分组成。其中“AN”表示模拟集成电路；“DN”表示数字集成电路；“MN”表示MOS集成电路。

(4) 日本东芝公司。它生产的集成电路的型号表示方法由五部分组成。

第一部分均为“T”，表示东芝公司的产品。

第二部分表示电路的种类，“A”表示是线性集成电路；“C”表示是CMOS集成电路；“D”表示是双极数字集成电路；“M”表示是MOS集成电路。

第三部分是用四位数字表示，其中第一位数字中的“4”表示是CMOS的400系列集成电路；“7”表示视听用集成电路。

第四部分表示是否为改进产品，分别用A、B、C来表示。

第五部分表示了集成电路的封装形式，“P”表示为塑料封装；“M”表示为金属封装；“C”表示为陶瓷封装；“P-LB”表示为塑料封装单列直插式；“F”表示为扁平封装。例如：TA7265P，表示为东芝公司生产，为视听电路使用的线性集成电路，封装形式为塑料封装。

(5) 日本电气公司。它生产的集成电路的型号表示由五个部分组成。字母表示电路的种类，其中“A”表示复合元件集成电路；“B”表示双极性数字集成电路；“C”表示线性集成电路；“D”表示CMOS集成电路。第三部分用四位数字表示集成电路的型号序号。

第四部分表示封装形式，其中“C”表示塑料双列直插封装；“D”表示陶瓷双列直插式封装；“G”表示扁平封装；“H”表示单列直插式塑料封装；“V”表示单列直插式偶数脚封装。例如： μ PD1704C，表示为电气公司生产的CMOS集成电路塑料双列直插封装。

(6) 欧洲电子专业协会。荷兰、英国及意大利等国家均按照欧洲电子专业协会对集成电路的命名方法来标注集成电路的型号。欧洲电子专业协会采用四个部分来表示集成电路的型号。

第一部分采用两个字母来表示集成电路的电路种类，其中“SD”表示为固体数字电路；“TD”表示模拟集成电路；“UD”表示模拟/数字混合集成电路。第二部分用一个字母表示集成电路的温度范围，其中“A”表示为无明确规定温度范围；“B”表示 $0\sim70^{\circ}\text{C}$ ；“C”表示 $55\sim125^{\circ}\text{C}$ ；“D”表示 $25\sim70^{\circ}\text{C}$ ；“E”表示 $25\sim85^{\circ}\text{C}$ ；“F”表示 $30\sim85^{\circ}\text{C}$ ；“G”表示 $40\sim85^{\circ}\text{C}$ 。

第三部分用四个数字表示了集成电路的功能序号。

第四部分用一个字母表示集成电路的封装形式，其中“C”表示为圆柱形封装；“P”表示塑料双列直插式封装；“D”表示陶瓷双列直插式封装；“Q”表示四列直插式封装；“F”表示扁平封装；“V”表示片状封装。如果在表示封装形式的字母后再后缀一个字母，则表示为封装的材料，如：“C”表示为金属—陶瓷封装；“G”表示为玻璃—陶瓷封装；“M”表示为金属封装；“P”表示为塑料封装。

3. 集成电路的检测

图2-31为对集成电路进行检测的方法示意图。一般对音响集成电路的检测方法主要有以下三种。

(1) 电阻检测法。它分为非在路检测和在路检测两种，非在路检测法就是在集成电路脱离电路板时用万用表的电阻挡测量集成电路各引脚与地间的正、反向电阻值，将测得的数值与该集成电路的各引脚间的正、反向电阻值资料进行比较，从而判断集成电路是否损坏。非在路检测法较为准确，但必须在有集成电路引脚资料时才

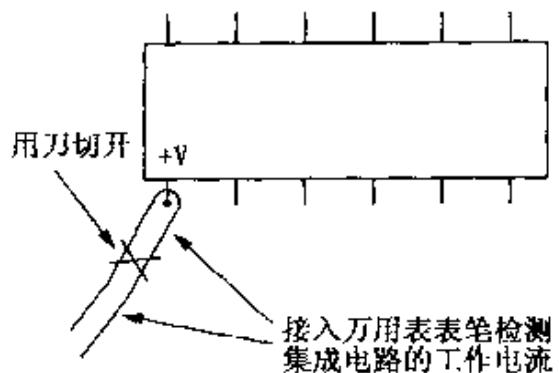


图 2-31 集成电路的检测示意图

可进行。在路检测法是指集成电路在电路板上与其他元件一起连体检测，在排除了集成电路外围电路元件损坏的情况下，可以采用在路检测法检测集成电路，它只可检测集成电路的短路或开路故障，但检测结果准确性较差。

(2) 电压检测法。这种方法检查集成电路较为方便。它是当集成电路工作时通过检测集成电路各引脚的静态和动态的电压值来判断集成电路的质量，但也必须在有集成电路各引脚的电压资料的情况下进行，如果没有资料，就要根据集成电路的电路特点进行检测，比如：采用 OTL 功率放大的集成电路的输出引脚的工作电压应为工作电压的 $1/2$ ；采用 OCL 功率放大的集成电路的输出引脚的电压应为 $0V$ 。

(3) 电流检测法。它是将万用表串接于集成电路的电源供电回路，通过检测其工作电流的大小判断是否存在短路或开路故障，但进行电流检测法时还是需要集成电路的工作电流的资料。

下面以图 2-32 为例介绍功率放大集成电路 LA4100 的内部电路工作原理及其应用电路。从图中可以看出，LA4100 主要由输入级、中放级、激励级和互补推挽级组成。

输入级由晶体三极管 T1 和 T2、电阻 R1、R2 和 R4 组成，T1 的基极为信号源的反向输入端，T2 的基极为信号源的正向输入端，

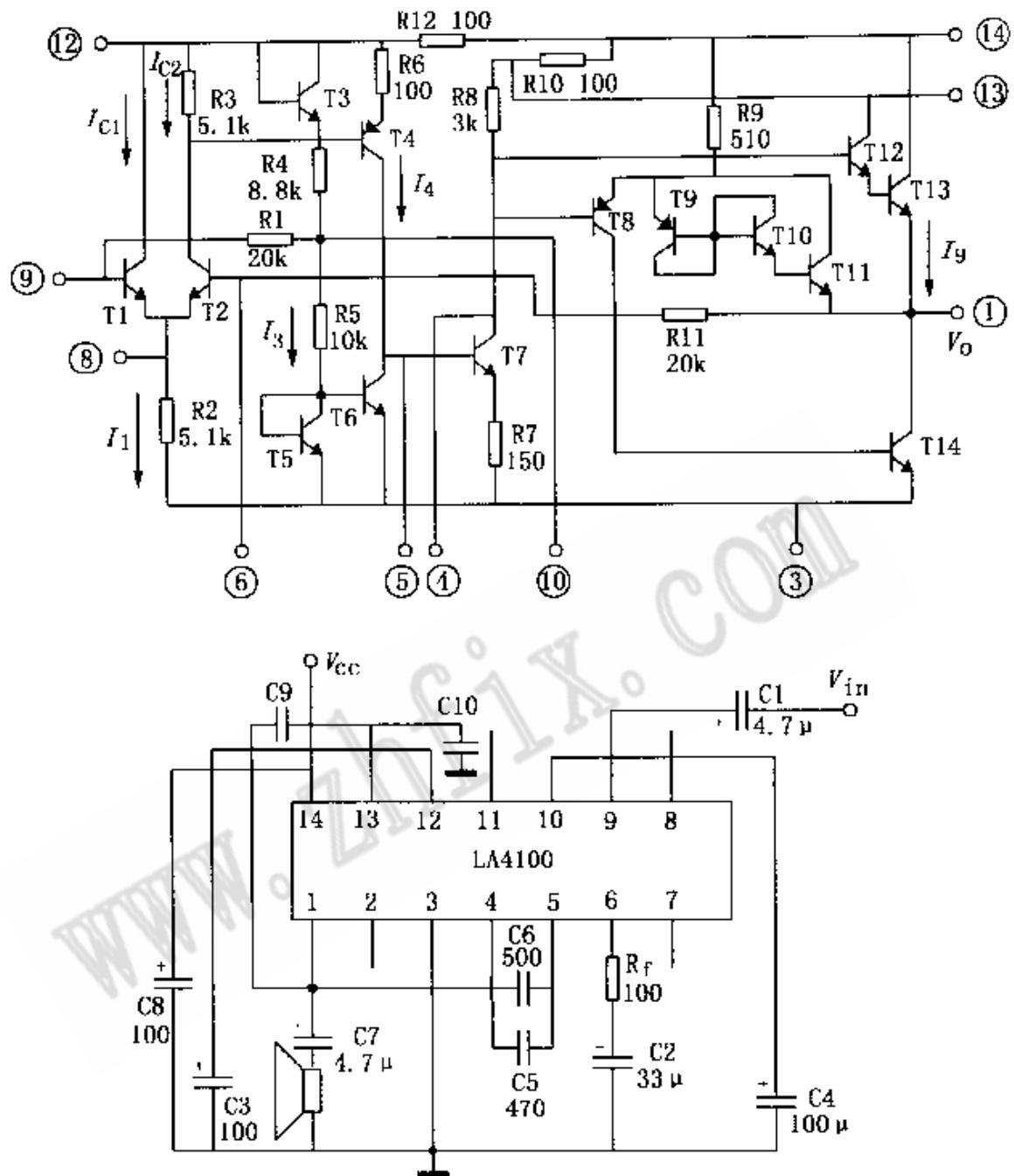


图 2-32 LA1100 的内部电路及其应用

R₂ 为发射极负反馈电阻。T₃、R₄、R₅、T₅ 为 T₆ 的基极偏置电路，T₃ 和 T₅ 起到二极管的作用，R₃、R₄ 和 R₅ 为分压式偏置。同时由于 T₅ 与 T₆ 相连接，给 T₆ 提供了基极偏置。T₂ 的输出端 1 脚经负

反馈电阻 R11 提供偏置, T2 的集电极接电阻 R3, 该级输出信号由 T2 的集电极输出。由于 T1 的集电极无电阻, 故此放大器不可对称输出, T1 起到了射极输出器的作用, T2 的基极通过外电路交流旁路。

T4 和 T7 组成了一个两级共射放大器, T6 为 T4 的集电极有源负载, T4 与 T7 相连接, 实现了直流电平移的作用。T3、R4、R5、T5 和 T6 组成了镜像恒流源电路。放大信号由 T2 的集电极输出, 经过 T4 和 T7 放大后输送至后级放大电路。

T7 为激励级, 由于功率输出较大, 故需要设置一激励级。电路中 R7 为 T7 的发射极电阻, 起到直流负反馈的作用, T7 的集电回路与输出电路相连接。

T8~T14 组成了互补推挽 OTL 功率大电路, T8 与 T14 复合为达林顿型 PNP 管, T12 和 T13 复合为达林顿型 NPN 管, 从而形成互补推挽 OTL 功率大电路。T9、T10 和 T11 等效为三只串联的二极管, 为互补推挽管的基极提供正向偏置工作电压, 使其工作于乙类状态, 并且克服了交越失真的问题, R8 为 T7 的集电极负载电阻, 同时 R8 与 R12 相连接, 构成了交直流电压并联负反馈, 稳定了工作点。R8 还能过其引脚与外接自举电容连接, 起到自举作用, 扩大了末级输出的动态范围, 该集成电路①脚是输出端, 与外接电解电容和扬声器相连接。

十二、散热片

自己动手制作功率放大器, 一个不容忽视的问题是功率放大器的散热。由于功率放大器内的变压器、电阻及功放管等在工作时均会产生一定的热量, 半导体元件对温度的变化较为敏感, 温度的升高会使反向电流增大, 击穿电压降低, 允许功率减小。如果不能很好地解决这一问题, 就会使功率放大器降低输出功率, 甚至烧坏机器。

降低功率放大器内部的热量的散发的方法有两种，一是增大发热元件的功率余量，使元件的温度降低，二是加强功率放大器内的通风与散热的手段。增大功率放大器元件的功率余量，除了能降低元件的温度外，还能延长其使用寿命。

自己动手制作功率放大器时，要注意功率放大器内部发热元件的布局，在机器的外壳上多留一些散热孔，使机器内部的空气产生对流，从而起到散热的效果。一般的布局方法如图 2-33 所示。

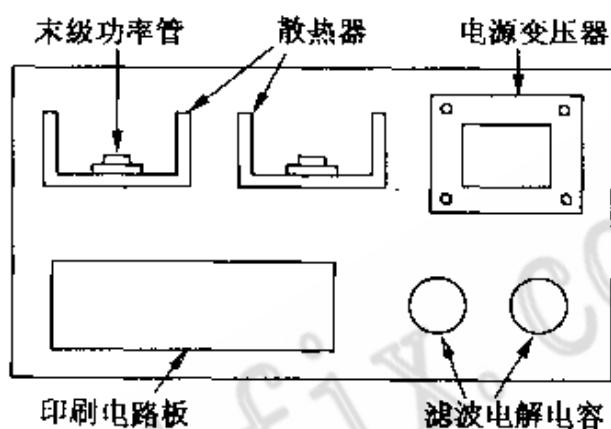


图 2-33 功率放大器内部元件布局示意图

另外，在功率放大器中一些发热量较大的元件，如末级输出功率管，都必须加装散热器，常见的散热器有散热板和散热型材两种，其外形如图 2-34 所示。

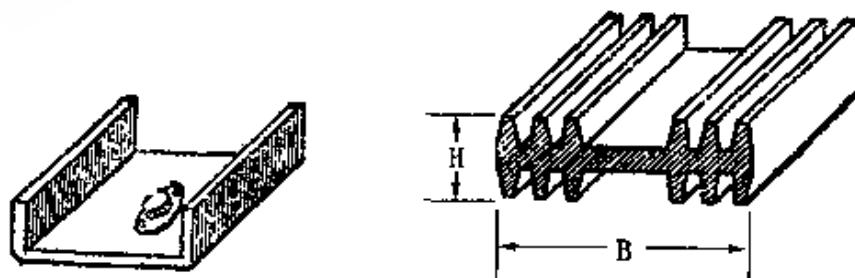


图 2-34 常见散热器的外形

散热板是用一些散热性能较好的如铝、铜等金属板，将功率管固定于金属板的表面，使其帮助其散热，也可以将功率管固定于功率放大器的金属底板上，这是音响发烧友常用的一种方法，既省去制作散热板的麻烦，也增大了散热的面积。需要注意的是，如果电路需要将功率管与外壳之间绝缘，就可在功率管的管座与散热板或底板之间垫上云母或聚酯薄膜等绝缘材料。

散热型材一般用于专业的功率放大器中，它是用铝镁合金挤压而成，可根据电路需要对型材进行任意切割，一般10cm长的散热型材可耗散60W左右的热量，有条件的音响爱好者在制作功率放大器时最好使用散热型材。

对于一些小功率放大管的散热，如推动级的晶体三极管，可用较薄的铜皮圈成一个小圆帽，直接套于管子的圆柱形的管壳上即可。

十三、继电器

继电器用于功率放大器中主要起保护扬声器的作用。当功率放大电路出现问题时，通过保护电路使继电器的线圈得电后铁心吸合，而带动内部的触点动作，从而切断扬声器系统，避免烧坏扬声器。继电器的结构如图2-35所示。

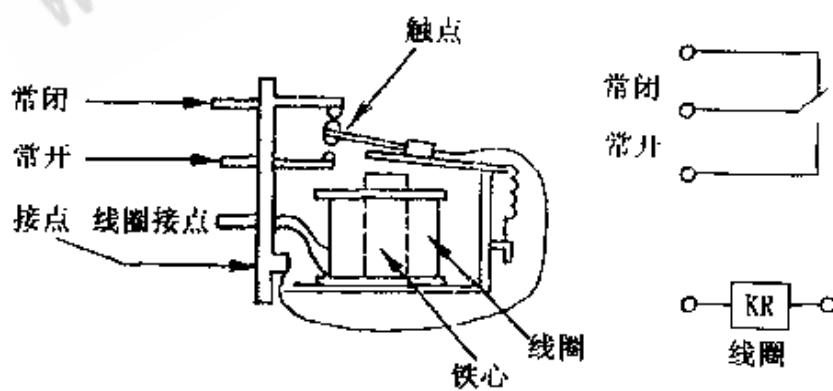


图2-35 继电器的结构

继电器的主要参数有吸合电压和接点工作电流。继电器的工作

电压有 3V、5V、6V、9V、12V 等，一般为吸合电压的 1.5 倍左右，而释放电压是吸合电压的 30% 左右。音响系统中使用的继电器的触点电流一般为 3A 左右。

第二节 功率放大器的基本电路形式

-、晶体管功率放大器

(一) 甲类放大器

甲类放大器工作于晶体管的线性放大区的中点，它的工作效率一般小于 50%，工作时晶体管始终工作于线性放大状态，在整个工作期间均处于导通状态。甲类放大器只适用于一般功率的放大电路中，其特点是，瞬态失真较小、无交越失真，重放声音质较好，但非线性失真较大，低频特性较差。甲类功率放大电路是目前使用较多的放大电路之一。

甲类放大器的工作原理如图 2-36 所示，放大管 VT 的静态工作点为管子放大区的中心，使管子工作在放大器的特性曲线的线性区域内，在管子工作的过程中，其集电极电压和电流的变化与信号电

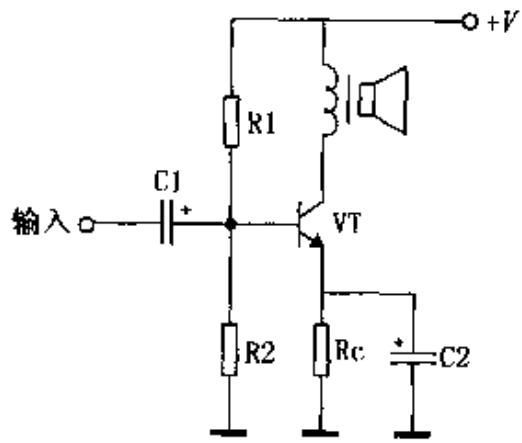


图 2-36 甲类放大器的工作原理

压的变化成正比。由于在无输入信号时，管子仍然需要提供一定的功率，因此甲类放大器（集电极）的工作效率较低，实际工作时一般只有30%左右。甲类放大器由于瞬态失真小、无交越失真，因此它的重放声音质较好，但它是通过牺牲工作效率来换取好的重放声音质的。

（二）滑动甲类放大器

滑动甲类放大器晶体管的工作点随信号幅度的变化而变化，其静态工作点略偏移于截止区，其工作效率也小于50%。

滑动甲类放大器的晶体管也属于单管线性放大管，在其工作期间也处于导通状态，其电路结构较为简单。滑动甲类放大器的静态工作点较低，从而使小信号放大的功耗下降，处于大信号放大时类似于甲类放大，其缺点是失真较大，低频特性较差。

（三）乙类放大器

乙类放大器的工作原理如图2-37所示。它由两只放大管组成，管子的静态工作点选择在基极电流为零的位置，因此只有在信号的上半周或下半周时，两只管子的集电极才有电流通过（分别对上半周和下半周信号进行放大），而无输入信号时，管子的集电极则无电流通过，不消耗功率，因此乙类放大器工作效率较高，达70%左右。由于乙类放大器的两只管子是交替进行工作，在两只管子对信号的交替过程中，存在一定的非线性失真（亦称交越失真），因此，乙类放大器的重放声音质较一般。

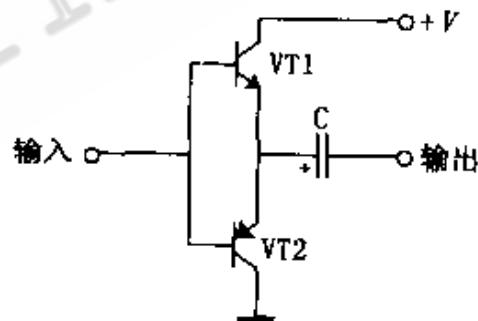


图2-37 乙类放大器的工作原理

（四）甲乙类放大器

甲乙类放大器的工作原理如图2-38所示。为了消除甲类放大器工作效率低和乙类放大器交越失真较大的缺点，甲乙类放大器通过

可变电阻 R1、电阻 R2、二极管 VD1、VD2 给两只放大管加上一定的偏置电压，在无输入信号时，始终有一只管子处于导通状态，当其中的一只管子工作时，而另一只管子不处于截止状态，因此，当两只管子轮流工作时，相互交替比较平滑，从而消除了交越失真。甲乙类放大器静态功耗较小，输出功率随输入信号的大小变化，工作的效率较高。

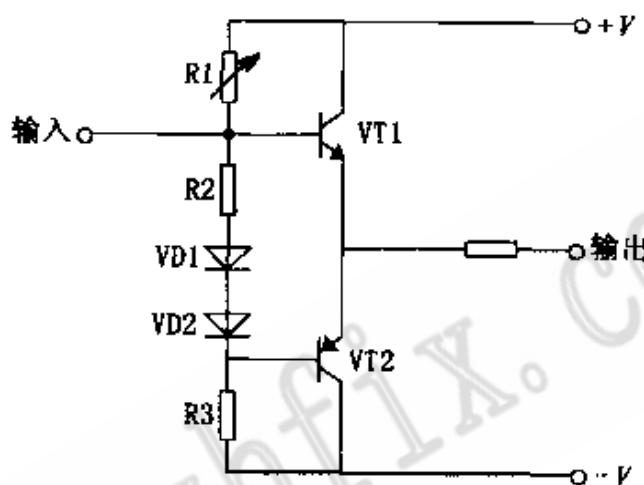


图 2-38 甲乙类放大器的工作原理

（五）超甲类放大器

超甲类放大器为两只管子进行交替推挽工作，管子的静态工作点选择于截止区附近，其输出功率随输入信号幅度的变化而变化，效率较高。超甲类放大器无交越失真，重放声的音质也较好。

（六）乙丙类放大器

乙丙类放大器为推挽工作形式，它是由乙类和丙类工作状态的两个部分串联而成。当输入信号幅度较小时，由乙类放大器工作放大状态，当输入信号幅度较大时，则由丙类放大器进行放大，这样可以将电源的等效电压提高一倍，使电路的瞬态响应特性较好。乙

丙类放大器的失真较小，其工作效率高于乙类放大器，但电路结构较为复杂。

按照功率放大器与扬声器之间连接方式的不同，功率放大器又主要有以下几种常见电路形式。

(七) OTL 功率放大器

OTL 功率放大电路的种类较多，但基本原理相同。图 2-39 所示为互补对称式 OTL 功率放大电路。VT1 为一只 NPN 型功率晶体管，VT2 为一只 PNP 型晶体管，它们组成互补推挽输出管，VT3 为电压放大激励管。音频信号经过 C1 耦合送入 VT3 进行放大后，从 VT3 集电极产生的音频信号正半周使 VT1 导通，负半周则使 VT2 导通，经过放大后的信号通过电容 C4 后输出至扬声器。

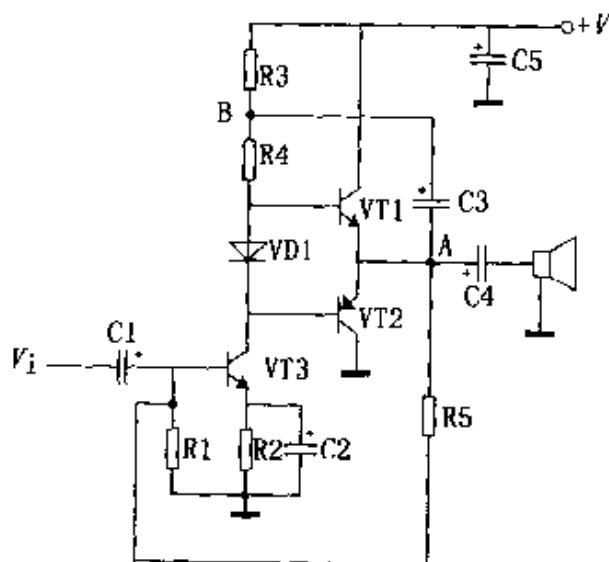


图 2-39 OTL 功率放大器的电路组成

电路中 VT_3 的基极偏置电压由 $+V/2$ 经 R_5 、 R_1 分压后得到，在静态时 VT_3 的静态电流较大，处于甲类工作状态。当 VT_3 导通后，其集电极输出的电压使 VT_1 和 VT_2 也导通，但 VT_1 和 VT_2 工作的静态电流较小，处于甲乙类状态。改变电路中 R_1 和 R_5 的阻值即可改变 VT_3 的静态工作电流，从而改变了 VT_3 集电极电压的大

小；进而改变了 VT1、VT2 导通状态。

电路中电容 C3 为自举电容，它和 R3 及 R4 组成自举电路，使 A 点的电位随输出电压的增高而增高，扩大了电路的动态范围。电阻 R3 为隔离电阻，将电路中的 B 点与电源隔开，当有较大的正半周信号出现时，使其与电源隔离。电容 C4 为输出耦合电容，它的作用是将放大管输出的信号传输至扬声器；隔开直流；同时还起一个电源的作用，当 VT2 对输入信号的负半周进行放大时，VT1 截止，此时 +V 不能给 VT2 供电，由 C4 所存储的电荷放电给 VT2 供电，因此 C4 的容量较大，一般在 $1000\mu F$ 以上。

OTL 功率放大电路的特点是：直流工作电压较高时，可以获得较大的输出功率；工作效率较高；频率响应较好；对负载的阻抗要求不高（负载的阻抗大小不同时，其输出功率随之改变不大）。

（八）OCL 功率放大器

OCL 功率放大电路是在 OTL 功率放大电路的基础上发展起来的，OTL 功率放大电路与扬声器之间有一只耦合电容，该电容对重放声信号的低频有一定影响，而 OCL 功率放大电路与扬声器之间采用直接耦合的方式。

OCL 功率放大电路的工作原理如图 2-40 所示。VT1 和 VT2 组

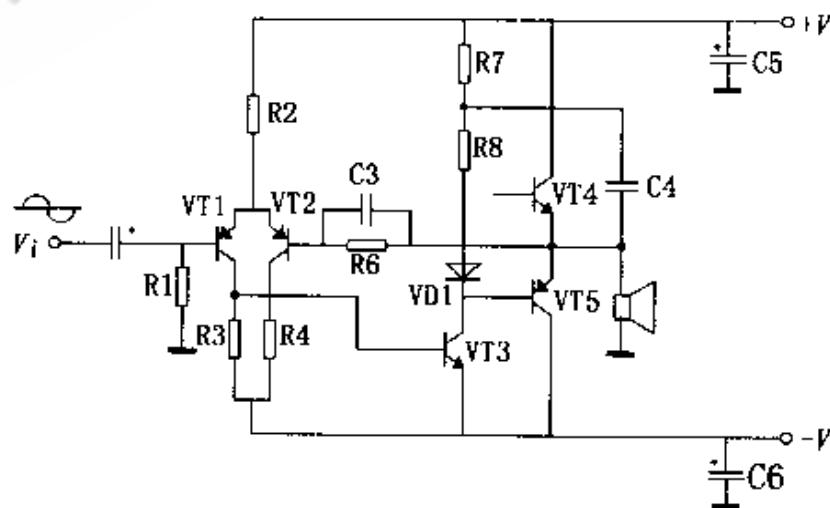


图 2-40 OCL 功率放大器的电路组成

成差动放大器，VT3 为推动激励管，VT4、VT5 为互补推挽输出管。当输入信号的正半周输入 VT1 的基极时，经过差动放大电路后再输至 VT3 基极。此信号为倒相信号，经过 VT3 再次倒相放大后，输送至 VT4 基极，使 VT4 导通。当输入至 VT1 基极的信号是负半周信号时，则经过倒相放大后使 VT5 导通，这样在扬声器上就得到一个完整的全波信号。

图中的 R6 为负反馈电阻，它具有较大的直流负反馈作用，使 VT1~VT5 的工作处于稳定状态，并使输出端的静态电压稳定于 0V。

OCL 功率放大电路的特点是：无输出耦合电容，使放大器重放的低频得到了一定的扩展；采用正负电源供电，在较低的供电电压的情况下，可以获得较大的功率输出；由于是定压式输出，对负载的阻抗要求不高。

必须注意的是，在 OCL 功率放大电路中应设有专用保护电路或保险丝对扬声器进行保护，OTL 功率放大电路由于有输出耦合电容的隔直流通作用，因此当电路出现故障时不会烧毁扬声器和放大管。而 OTL 功率放大电路无输出耦合电容，当电路出现故障时，输出端静态电压可能不为 0V，而扬声器的直流电阻较小，因而会产生较大的直流电流，烧毁扬声器和放大管。

目前，大部分功率放大器均采用 OCL 功率放大电路。

(九) BTL 功率放大器

图 2-41 所示为 BTL 功率放大电路的工作原理图。它是由二组 OTL 或 OCL 功率放大电路和一级倒相电路组成，扬声器接在两组 OTL 或 OCL 输出电路之间。

图中的 VT1 和 VT2 为 OCL 输出电路，VT3、VT4 为另一路 OCL 输出电路。当输入的音频信号为正半周时，VT1 导通；VT2 和 VT3 截止；经 VT1 放大倒相后的信号使 VT4 导通，此时电源的正极、VT1、扬声器及 VT4 形成一个音频放大的回路。当输入的音频

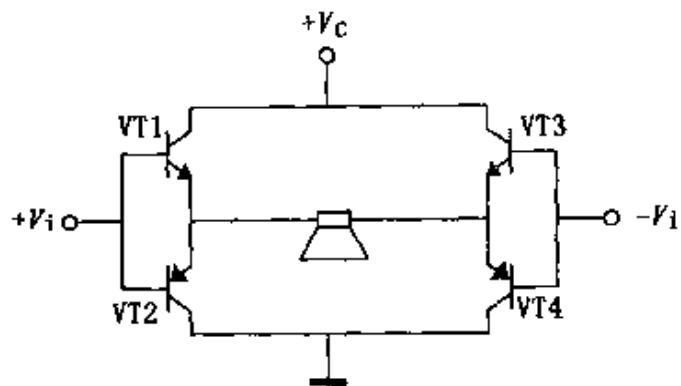


图 2-41 BTL 功率放大器的电路组成

信号为负半周时，则 VT2、VT3 导通，VT1、VT4 截止，此时由电源的正极、VT3、扬声器及 VT2 形成一个音频放大回路。由图中可以看出 VT1~VT4 组成了一个桥式且平衡对称的电路。

BTL 功率放大电路的最大特点是在电源供电电压相同的情况下，扬声器所得到的电压比其他类型的放大器高出一倍，输出功率可以增大 4 倍，电路结构较为对称，故信号的失真较小。

二、场效应管功率放大器

场效应管组成放大电路时，需要建立合适的静态工作点，而且场效应管是电压控制器件，因此需要有合适的栅源偏置电压。常用的直流偏置电路有两种形式，即自偏压电路和分压式偏压电路。

图 2-42 (a) 所示是一个自偏压电路，其中场效应管的栅极通过电阻 R_g 接地，源极通过电阻 R 接地。这种偏置方式靠漏极电流 I_D 在源极电阻 R 上产生的电压为栅源极间提供一个偏置电压 V_{GS} ，故称为自偏压电路。静态时，源极电位 $V_S = I_D R$ 。由于栅极电流为零， R_g 上没有电压降，栅极电位 $V_G = 0$ ，所以栅源偏置电压 $V_{GS} = V_G - V_S = -I_D R$ 。耗尽型 MOS 管也可采用这种形式的偏置电路。

图 2-42 (b) 所示是自偏压电路的特例，其中 $V_{GS} = 0$ 。显然，这种偏置电路只适用于耗尽型 MOS 管，因为在栅源电压大于零、等于

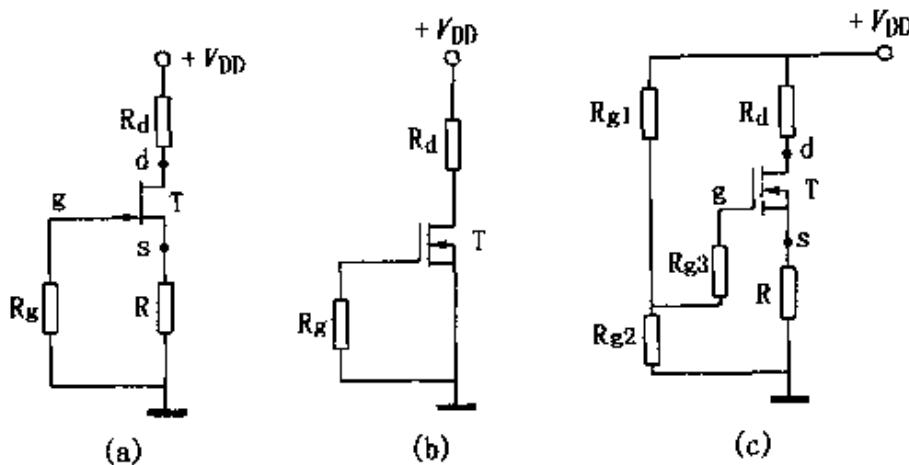


图 2-42 场效应管放大电路的偏置电路

零和小于零的一定范围内，耗尽型 MOS 管均能正常工作。

分压式偏置电路是在自偏压电路的基础上加接分压电路后构成的，如图 2-42 (c) 所示。静态时，由于栅极电流为零， R_{g3} 上没有电压降，所以栅极电位由 R_{g2} 与 R_{g1} 对电源 V_{DD} 分压得到，即： $V_G = R_{G2}V_{DD} / (R_{G1} + R_{G2})$ ，源极电位 $V_S = I_D R$ 。这种偏置方式同样适用于结型场效应管或耗尽型 MOS 管组成的放大电路。

场效应管放大电路与晶体管放大电路一样也有三种基本组态，即共源极、共漏极和共栅极放大电路（由于共栅连接时，栅极与沟道间的高阻未能发挥作用，故共栅电路很少使用）。图 2-43 分别为场效应管共源极、共漏极放大电路的形式，它分别与三极管放大电路的共射电路、共集电路相对应。二者相比较，共源电路与共射电路均有电压放大作用，而且输出电压与输入电压相位相反。为此，可统称这两种放大电路为反相电压放大器。共漏电路与共集电路均设有电压放大作用，而且输出电压与输入电压同相位。因此，可将这两种放大电路称为电压跟随器。

由于场效应管的低频跨导一般比较小，所以场效应管的放大能力比三极管差，因而共源电路的电压增益往往小于共射电路的电压增益，实际应用中可根据具体要求将上述各种组态的电路进行适当

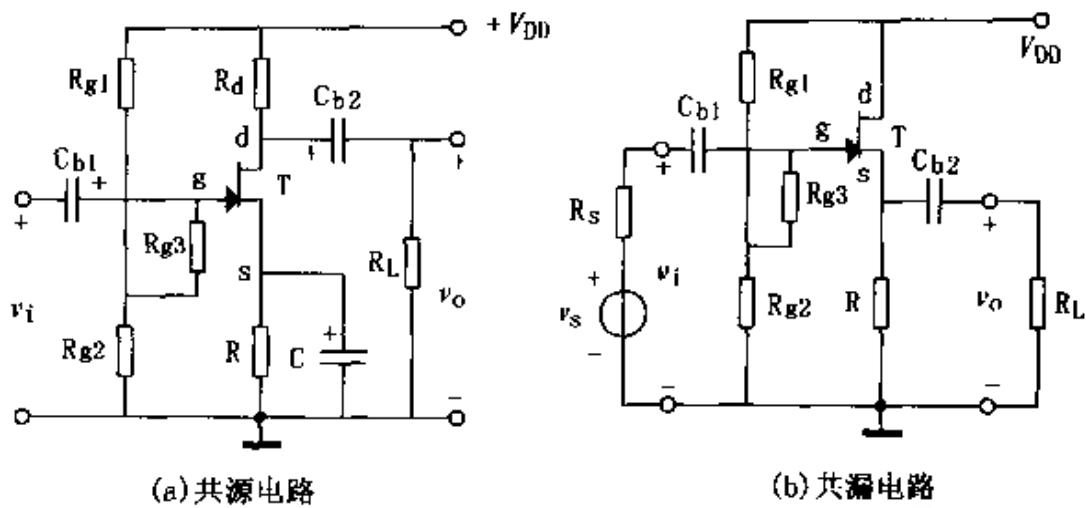


图 2-43 场效应管放大电路的形式

的组合，以构成高性能的放大电路。

目前在许多音响器材中，常使用场效应管作为高保真放大器的放大管。图 2-44 为双声道 40W 场效应管功率放大电路。V1 和 V2 组成高输入阻抗的差分输入级，V3 为推动级。V5、V6 组成了场效应管输出级。V4 的作用是使末级输出偏置处于甲乙类状态。该电路没

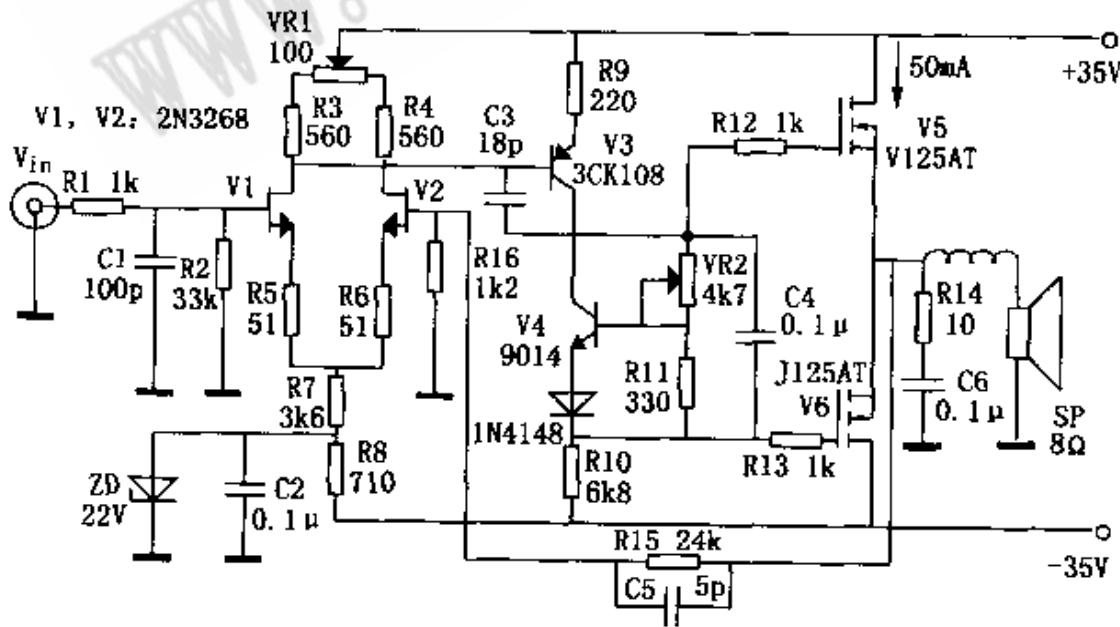


图 2-44 双声道 40W 场效应管功率放大电路

有使用反馈电容，使放大器工作于直流放大状态，因此低频响应较好。

三、电子管功率放大器

电子管功率放大器的类型较多，目前比较流行的有单端 A 类、A 类推挽、AB1 类、AB2 类功放等，输出功率一般有 10W、30W、40W、60W 等多种。

图 2-45 为电子管功率放大器常用的几种接法。

(一) 标准接法，自偏压方式

标准接法是按照束射四极管特性所规定的要求，其功放的特点是放大效率高，各项电性能指标一般。电子管推挽功放级的栅极负偏压一般有两种方式，即自偏压方式与固定偏压方式。

在 AB 类推挽功放中，通常采用的是自偏压方式，使输入电压低于栅极负压，使功放始终工作于线性放大区域内，故栅极始终处于负电位，不产生栅流，失真度也较小。只要按照已经设计好电路中所规定的数值，一般无须进行调试，功放均能正常地工作。

(二) 超线性接法，自偏压方式

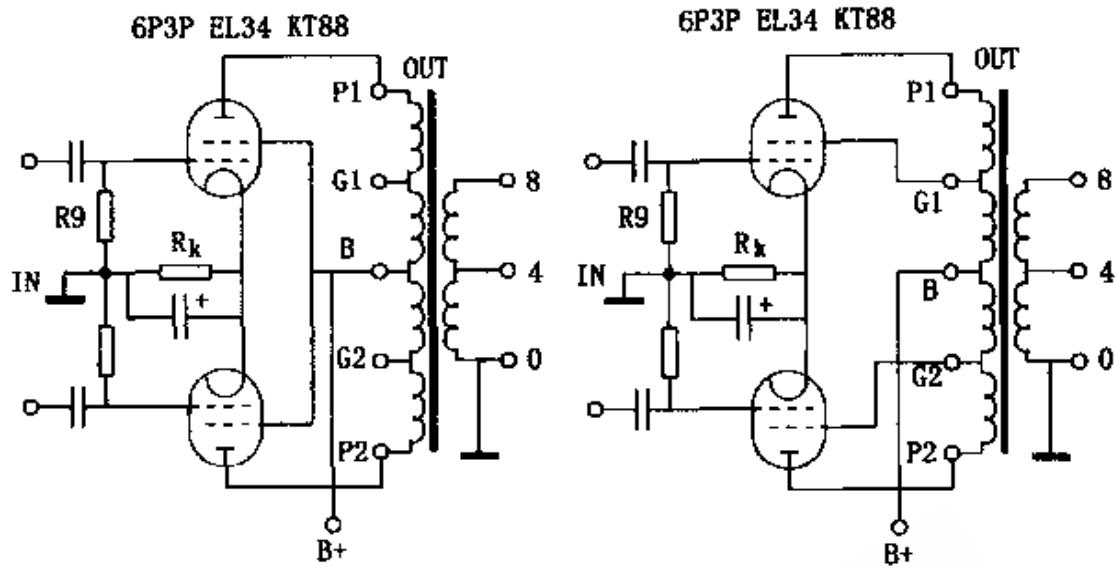
超线性放大器的主要特点是输出管有帘栅极反馈，输出变压器上帘栅极抽头位置按阻抗比 0.18 来计算，故匝数比为其平方根，即约等于 0.43。

束射四极管若有帘栅极反馈，则最大输出将会减小，但放大器的线性、频率响应与保真度均有提高。为了补偿其输出的不足，可采用提高功放级的直流电压来适当提高输出功率。

其工作状态为 AB1 类放大，采用自偏压方式，因此工作稳定可靠，装管方便，成功率高。

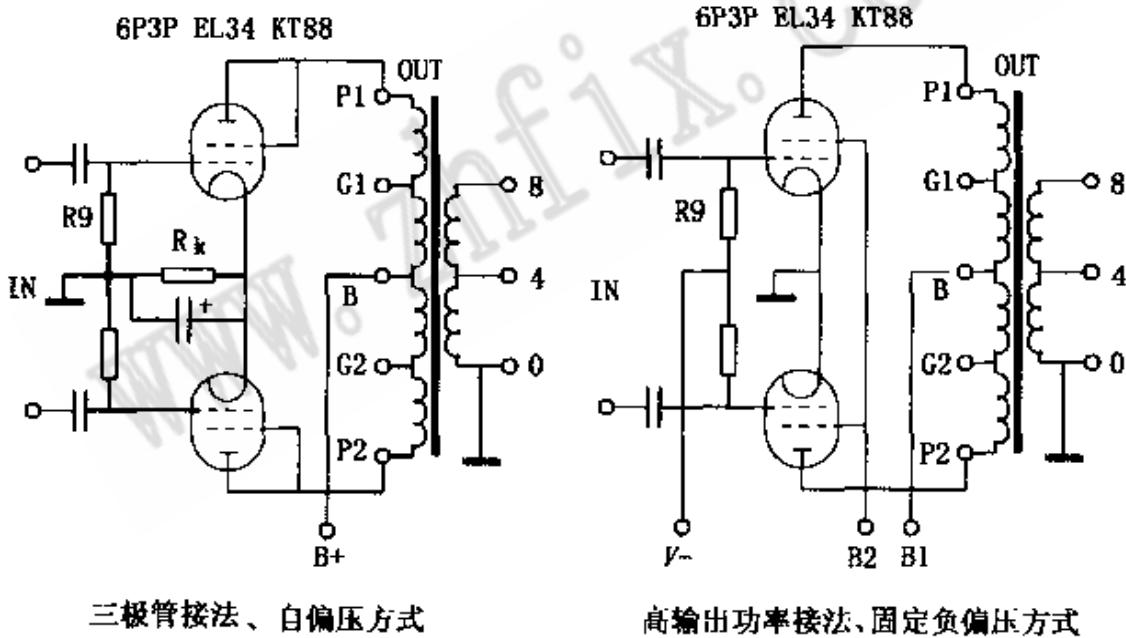
(三) 三极管接法，自偏压方式

三极管接法即为著名的威廉逊放大器，其电路特点是全部采用电子三极管，特别是将输出高性能的束射四极管改为三极管接法。功



标准接法、自偏压方式

超线性接法、自偏压方式



三极管接法、自偏压方式

高输出功率接法、固定负偏压方式

图 2 45 电子管功率放大器常用的几种接法

放管的栅极采用自偏压方式，失真小，工作稳定。

威廉逊放大器的最大特点是保真度高，频率响应宽，从 10Hz~20kHz，增益平坦。但输出效率比超线性放大器差。

(四) 高输出功率接法，固定负偏压方式

为了提高放大器效率，使输出功率增加，可采用高输出功率接法。即：功放管屏极通过输出变压器接至高压电源 B1，帘栅极接至高压电源 B2。

栅极负偏压根据所采用功放管的特性不同，分别由专门固定的负压电源供给，这样就可充分地发挥出各功率管的最大功效。但固定栅负压的配置除按照其规定值以外，如果调试不当或电路中负压调节电位器接触不良，则可能导致功放管过载损伤电子管。

第三节 功率放大器的附属电路

一、电源电路

目前，大部分功率放大器的电源变压器采用环形变压器。与传统的变压器相比，环形变压器的铁心是采用低铁损的高磁密粒取向的冷轧硅钢带卷绕制成，故俗称“环牛”。由于环形变压器磁路漏磁较小，磁通密度大，因此效率很高，而且体积较普通变压器小得多。在实际使用中无因铁心松动而产生噪声，对电路的干扰也很小，它非常适合作为音频功率放大器的电源变压器。它的结构如图 2-46 所示。

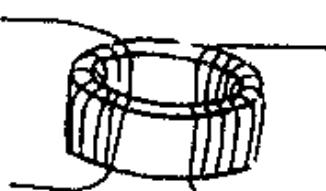


图 2-46 环形变压器的
结构示意图

在选择环形变压器时应进行空载电流和电压调整率的检测，一般 100VA 左右的环形变压器空载电流应小于 50mA，其调整率一般应小于 5%。同时在使用中须注意，由于环形变压器存在一定的剩磁，因而起动电流较大，在其初级应加装保险丝。在安装环形变压器时其固定架与底板不可同时接地，防止产生短路。

大家知道，交流电源经过电源变压器降压、整流、滤波后形成

的直流电源，含有一定的纹波电流，即使进一步提高滤波电容的容量，也并不能彻底消除纹波电流。纹波电流特别对较微小的信号干扰较大，使音响器材的重放声音失去其中的细节成分。目前品质较高的功率放大器是将前后级分为二个电源分开供电，较为理想的是采用有源伺服高速电源来给前级放大器供电。有源伺服电源(Active Servo Supply)是日本松下公司研制开发的新一代高速电源，该电源的稳压性能很好。图 2-47 为有源伺服高速电源电路的原理图，主要由运算放大器 LF358 和两只三端稳压块组成。在自制该电源时必须注意不同生产厂家的运算放大器和三端稳压块对电源内阻的影响有

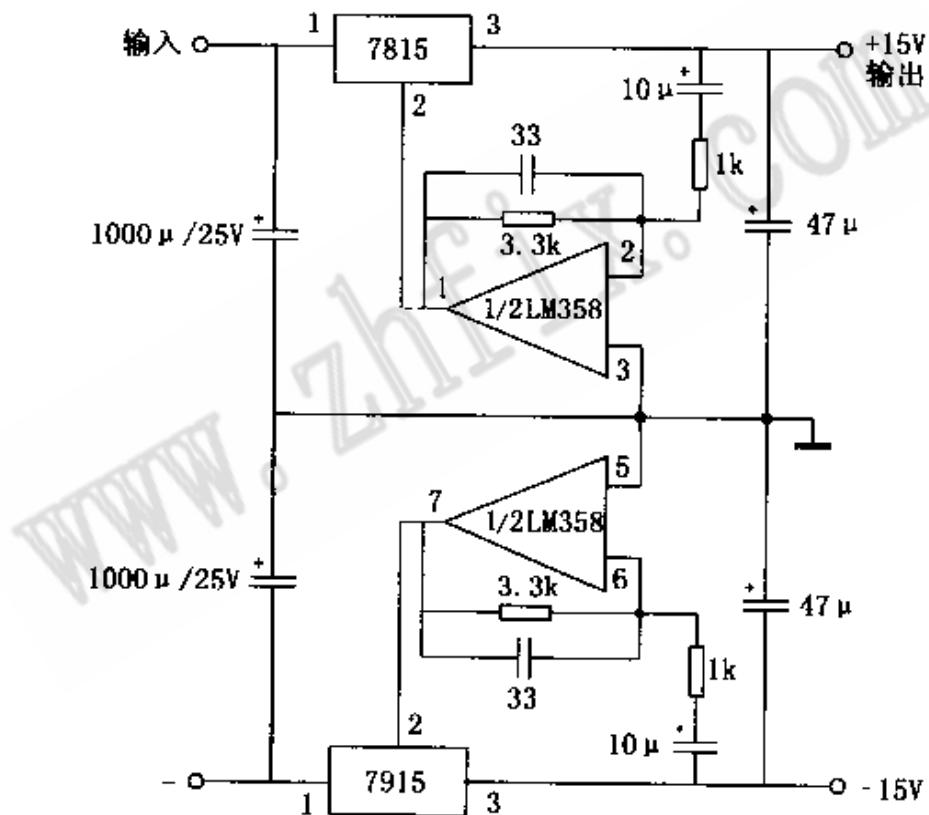


图 2-47 有源伺服高速电源电路

所不同。如果电源内阻较大，电源的输出电压就会随负载电流的变化而变化，因此需采用内阻低、频率响应宽、失调电压小的三端稳压块和转换速率高、噪声低的运算放大器。电容可以选用进口正品优质电容，如“黑金刚”、“红宝石”。电阻可以选用精度较高的五色

环电阻。

对于音响系统中的后级放大器或一些前后级合并的功率放大器，采用双桥式整流电路供电，其电路原理如图 2-48 所示。它可以抑制经过次级中心抽头引入放大器的纹波电流，并且可以消除交流噪声。在电源的滤波部分一般都采用容量大于 $10\ 000\ \mu\text{F}$ 的滤波电容，以满足放大器在大动态信号工作时对供电电流的要求，使电路不产生削波失真。同时在大容量滤波电容的两端并有一些容量递减的小容量电容，以减小电源的内阻。另外，在前、后级放大器的电源供电系统中还采用了一些优化电源的手段，如采用快速恢复型整流二极管，以减小高频电源内阻等。

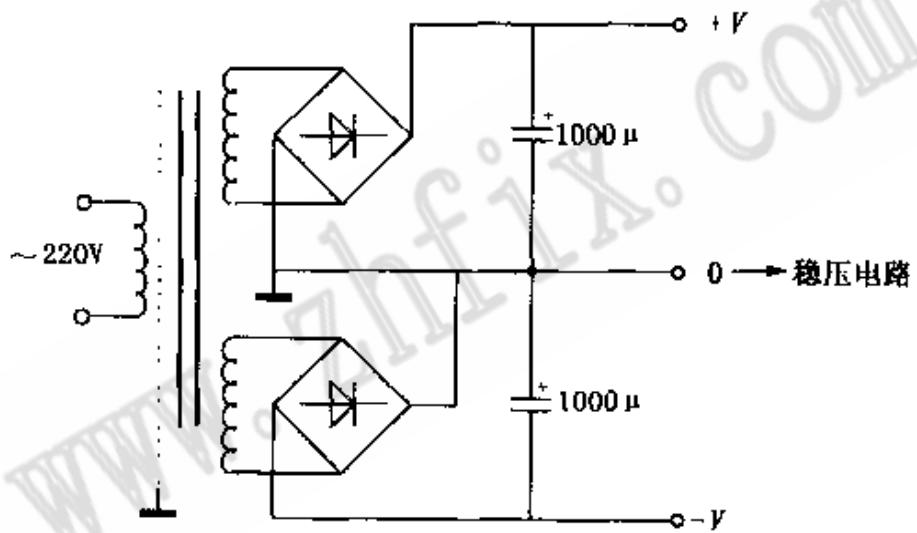


图 2-48 双桥式整流电路

二、前置放大电路

由于一般信号源所输出的信号幅度较小，仅为几十 dB 的增益，较难使功率放大器输出较大的功率，因此必须在功率放大器的前面增加一级乃至数级电压放大电路，将信号源输入的小信号放大至功率放大器所需要的信号幅度（一般为 1~2V），此类放大器被称为前置放大器。

前置放大器在对信号源输入的信号电压进行放大的同时，还对不同信号源所输入的不同阻抗、不同幅度的电压进行阻抗匹配等处理后送至功率放大器。

图 2-49 所示为前置放大器的电路组成示意图。它由输入信号功能选择开关、输入信号放大、音量、音调、响度、平衡控制等电路构成。

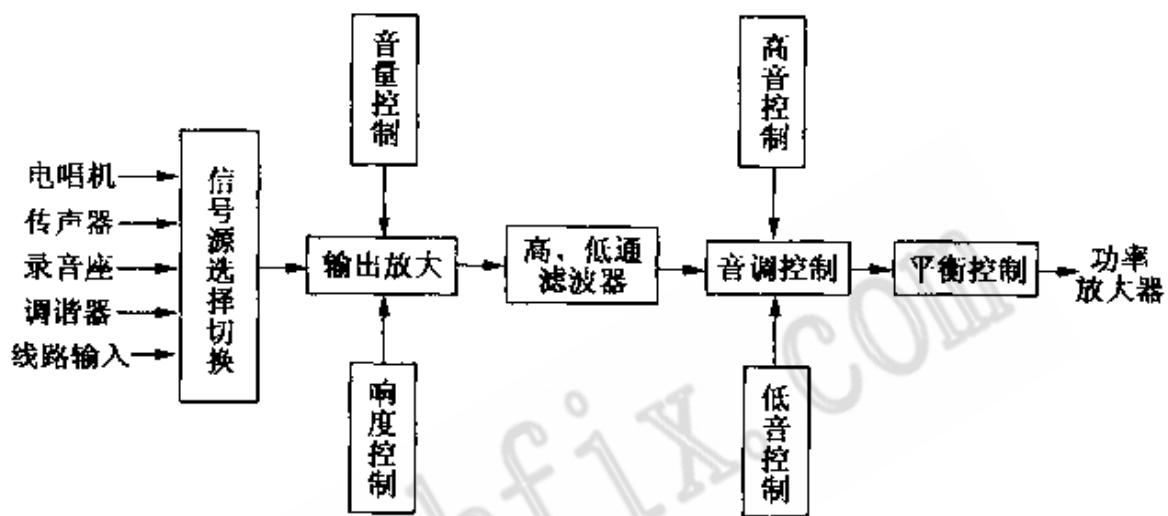


图 2-49 前置放大器电路组成

前置放大器在音响系统中可以将各种不同的音源信号进行切换、选择，将电平幅度较小的信号放大后去推动后级功率放大器，并对输入的音源信号进行音调、音量、平衡等一系列控制，它是功率放大器的控制中心。

目前，较为专业级的前置放大器都设计成直通式，即信号源几十毫伏的信号经过前置放大器放大至 1~2V 的幅度后，直接送至功率放大器。前置放大器中不设置音调、响度等控制，仅设置左右声道各自独立的音量电位器。并且采用了较为精密的元器件和先进的放大电路，如采用金属膜电阻、钽电容、RCA 镀金插座、有源伺服高速电源等，其目的是为了减少音色修饰电路对信号源信号的影响，尽量保持重放声与信号源的“原汁原味”。

在一般的普及型功率放大器的前置放大器中通常都设有较多的音色控制电路，如音调、响度、左右声道平衡等电路，有的机器中还设置了动圈式唱头放大器，其内部所使用的元器件也较为一般，故其重放声音质表现也平平。

在合并式功率放大器或独立的前置放大器中，通常采用运算放大器作为线路放大器，如LF353、LM382、LM833、NE5532、NE5535、TL1082等。图2-50为采用运算放大器NE5535的线路放大器。

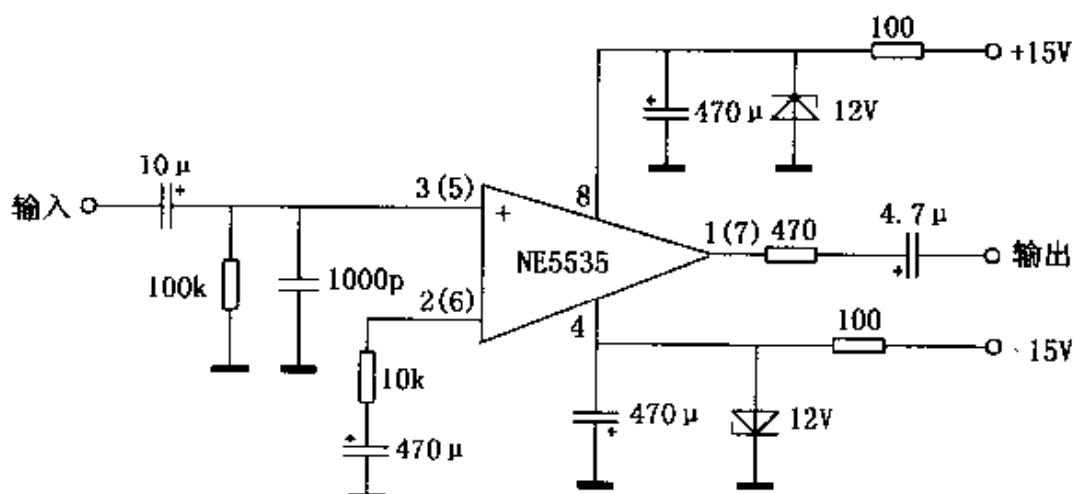


图2-50 采用运算放大器NE5535的线路放大器

(一) 信号选择控制电路

功率放大器的信号源选择电路的作用是选择不同音源器材的信号输入，它一般位于前级放大器的输入端，其控制形式主要有以下两种。

1. 互锁琴键式和旋转式开关控制

互锁琴键式开关控制是通过机械式具有互锁作用的轻触开关对信号源进行切换。当需要输入某一信号源的信号时，只需按下相应的开关，此开关即接通，将信号送至放大器放大。当需要重新选择信号源时，再按下相应的开关，由于开关的互锁作用，原信号源的控制开关被弹起断开，互锁开关则将刚选择的信号源接通。它的外

形如图 2-51 (a) 所示。在有的前置放大器中采用了旋转式转换开关。它是通过内部动触点与静触点的旋转转换，进行触点的打开或闭合，从而进行信号源的选择。它的外形如图中 2-51 (b) 所示。

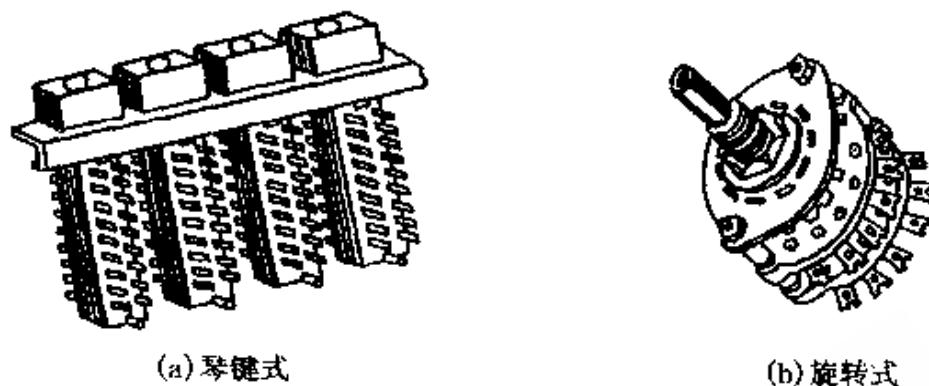


图 2-51 互锁琴键式和旋转式开关

互锁琴键式开关和旋转式开关的控制较为简便、直观，但使用时间较长后其触点表面会氧化，产生接触不良故障。

2. 电子开关式信号源选择电路

电子开关式信号源选择电路是利用晶体三极管(带阻三极管)构成开关电路。其基本电路如图 2-52 所示。在图 (a) 中，VT1、VT2 为电子开关管，当开关 K 断开时，VT1 无基极偏置电压，处于截止状态。当开关 K 闭合时，+V 通过 K 给 VT1 基极一个偏置电压，使 VT1 导通。VT1 集电极由高电平转为低电平，从而使 VT2 也导通， V_o 输出高电平。在图 (b) 中， $K_1 \sim K_6$ 为电子开关、①~⑥脚为信号源输入端； $K_a \sim K_f$ 为信号源控制开关，⑦~⑫脚为信号源控制端；⑬~⑯脚为信号源输出端。比如当开关 K_a 接通后，给电子开关 K_1 一个高电平信号， K_1 接通，将 1~6 信号脚输送至 13 脚后输出至放大器。当 K_a 断开时，电子开关为低电位（即断开），从而起到信号源的选择作用。

(二) 音量控制电路

所谓音量控制就是控制前级放大电路输送至后级功率放大电路

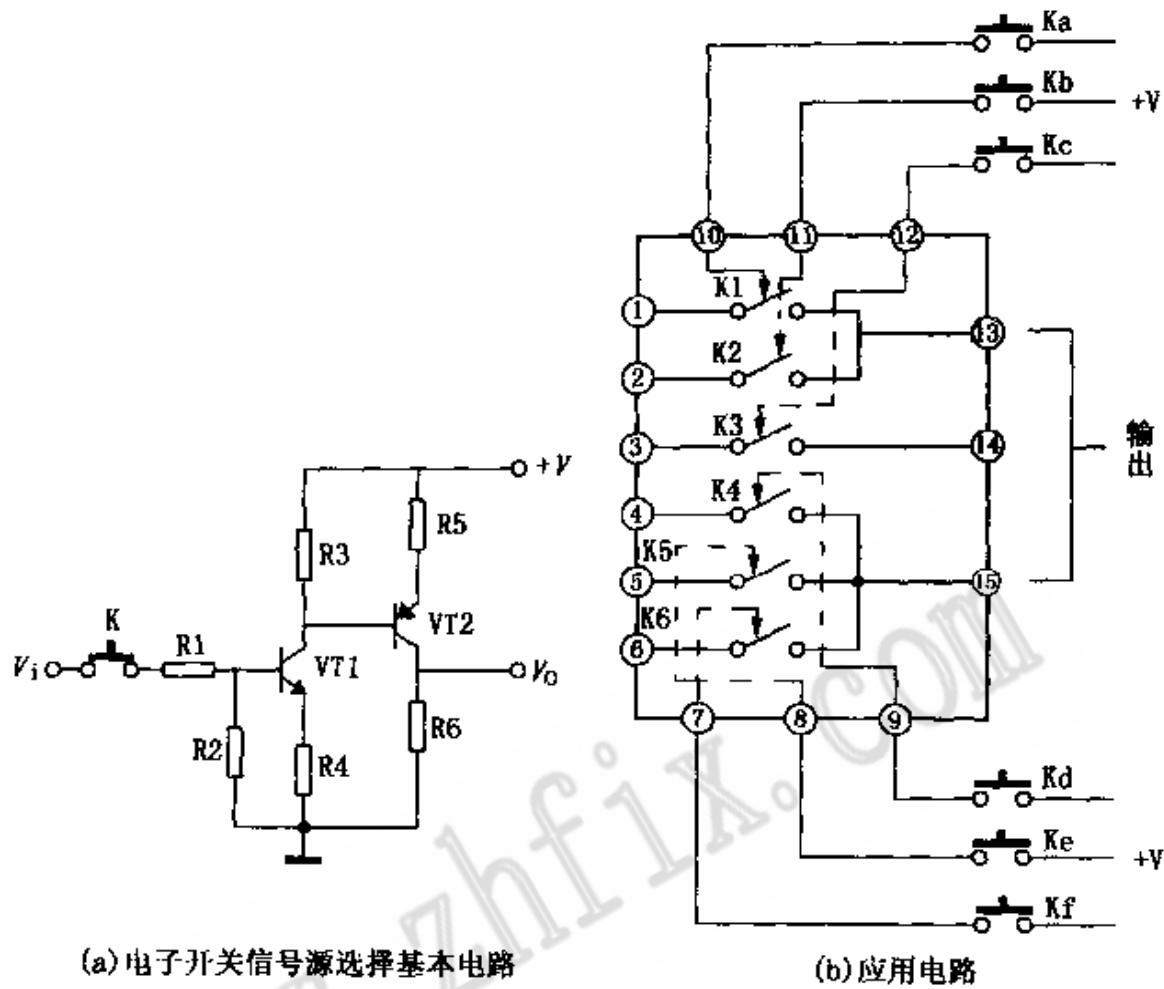


图 2-52 电子开关式信号选择电路

的信号的大小，从而控制重放声的大小。一般音量控制电路主要有衰减式音量控制电路和电子式音量控制电路两种。

音量控制电路的基本工作原理如图 2-53 所示。 R_P 为音量控制

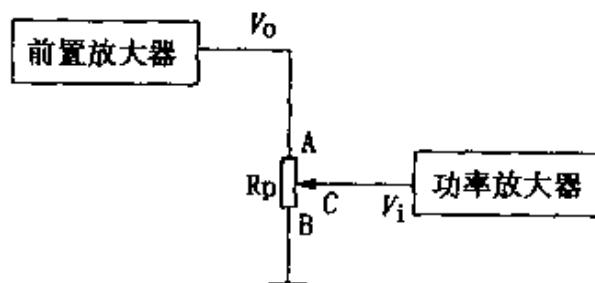


图 2-53 音量控制电路的基本原理

电位器， R_p 的 A 端与前置放大器的输出端相连接，B 端与地相连接，C 端与功率放大器的输入端相连接，则

$$V_i = \frac{R_{PCB}}{R_{PAB}} \times V_o$$

从式中可以看出这是一个分压电路，调节 R_p 就可以改变 V_i 的大小。当 R_p 的动片移至最上端时前置放大器输出的信号全部进入功率放大器，音量为最大。当 R_p 的动片移至最下端时，无信号进入功率放大器，音量为最小。

使用过普通旋转式音量电位器的人都知道，普通的音量电位器使用时间较长后，由于电位器炭膜层的磨损，在调节时会出现“喀喀”的噪声，影响了器材的高保真要求。如果使用电子音量控制电路，就可以消除这种噪声。电子音量控制电路有两种控制形式，一是直接在机器的面板上手动控制，二是通过红外线进行遥控控制。

电子音量控制电路的基本工作原理如图 2-54 所示。它是通过改变前置放大器反馈的深度来进行音量控制的。从图中可以看出只要滑动 R_p 的动片就可以改变前置放大器的电路增益。由于电位器只对前置放大器的直流电位进行控制，信号不经过电位器，因此消除了噪声。

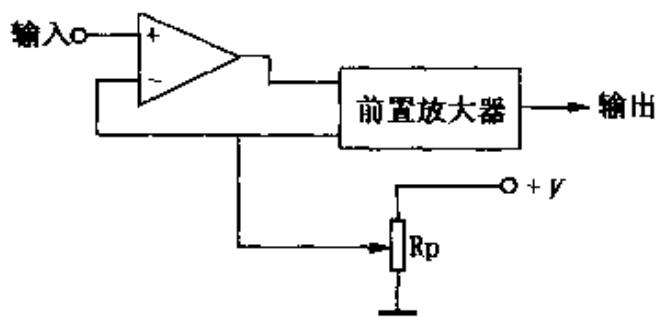


图 2-54 电子音量控制电路的基本原理

对于双声道音量控制，一只音量控制电位器即可。如果发烧友要对音量控制部分摩机，可将电位器换成电子音量控制电路。

另外，目前大部分的功率放大器中的音量电位器均为双连同轴电位器，它是将两只单联电位器结合在一起，由一根转轴控制，使两只电位器的阻值同步变化。由于一般非音响专业人士对于音响系统的调校缺少一定的经验，因此在普及型的音响器材中一般都采用双连同轴电位器进行左右声道的音量控制，这样可以使左右声道的输出功率、失真度、信噪比等指标完全相同，以达到较理想的立体声效果。

在较专业的功率放大器中一般是将左右声道的音量分开控制，可以使发烧友较方便地进行音量调节，以弥补听音环境的缺陷，满足欣赏音乐的需要，保证正确的声像位置。

(三) 音调控制电路

音调控制电路的作用是对音频信号的各频段进行提升或衰减，以弥补听音环境造成的缺陷，满足听音者的需要。音调控制电路主要有以下两大类：

(1) 高、低音式音调控制电路：它主要有衰减式音调控制电路、负反馈式音调控制电路以及衰减负反馈混合式音调控制电路。此类电路比较简单，只能对高、低音两个频段进行提升或衰减，一般用于中、低档机器。

(2) 图式音调控制电路：它包括 LC 图式音调电路以及分立、集成图式音调电路。它可以将音乐的整个频段分为五段、十段或十五段，可以对某一个频段进行单独的提升或衰减，此类电路较为复杂，一般用于较高档的机器中，也可以将其单独组成一个器材(均衡器)。

1. 衰减式音调控制电路

衰减式音调控制电路又称 RC 衰减式音调控制电路，它是利用电阻、电容的串联和并联网络所具有的选频特性，对信号频率进行提升或衰减。图 2-55 所示分别为高音提升、低音提升、高音衰减、低音衰减的基本单元控制电路。高、低音提升电路是通过降低中音的

增益，从而使高、低音相应得到提升。高、低音衰减电路是通过电容对不同信号频率的容抗变化所呈现的选频特性，对高、低音进行衰减。

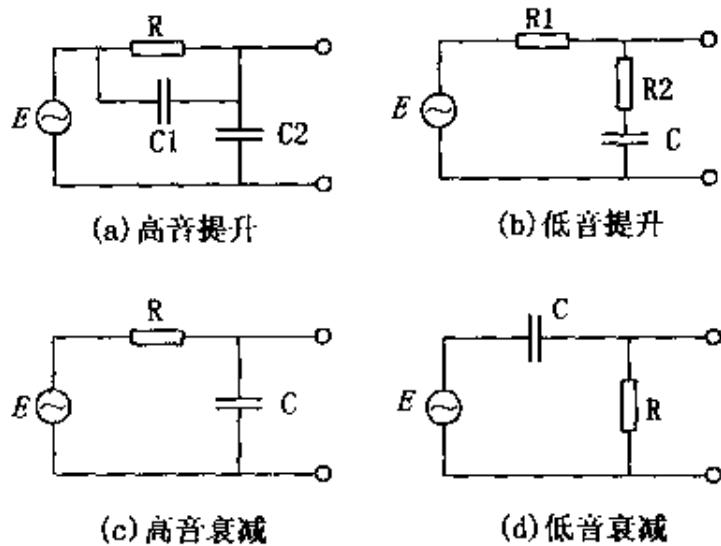


图 2-55 高低音提升和衰减电路基本原理

图 2-56 所示为衰减式音调控制电路，RP1 为高音控制电位器，当需要提升高音时，RP1 的动片滑向 A 点，由于电容 C1 对输入信号的高频部分呈现很小的阻抗，高频信号经 R1、C1、RP1 的动片后直接送至后级放大器。当需要衰减高音时，RP1 的动片滑向 B 点，此

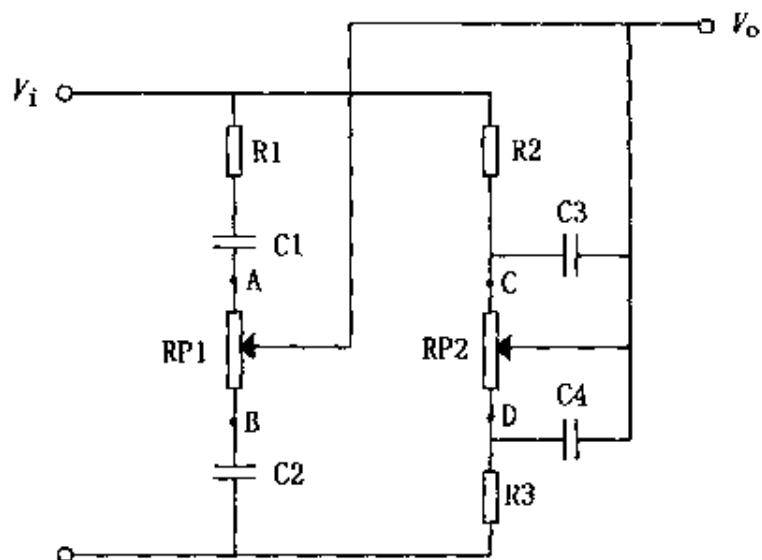


图 2-56 衰减式音调控制电路

时由于 RP1 所呈现的阻值为最大，同时 C2 对高频呈现的容抗较小，从而使高频信号衰减最大。RP2 为低音控制电位器，当需要提升低音时，RP2 的动片滑向 C 点，此时 C3 被短路，C4 与 RP2 并联，由于 C4 对低频信号呈现出较大的容抗，低频信号经过 R3 后直接送至后级放大器；当需要衰减低频时，RP2 的动片滑向 D 点，此时 C4 被短路，C3 与 RP2 并联，由于 C3 对低频呈现较大的容抗，从而对低频信号进行衰减。

2. 负反馈音调控制电路

负反馈音调控制电路的基本单元电路如图 2-57 所示。RP1 为低音控制电位器，当 RP1 的动片滑向 A 点时，低音提升最大，反之低音衰减最大。RP2 为高音控制电位器，当 RP2 的动片滑向 C 点时高音提升为最大，反之高音衰减最大。

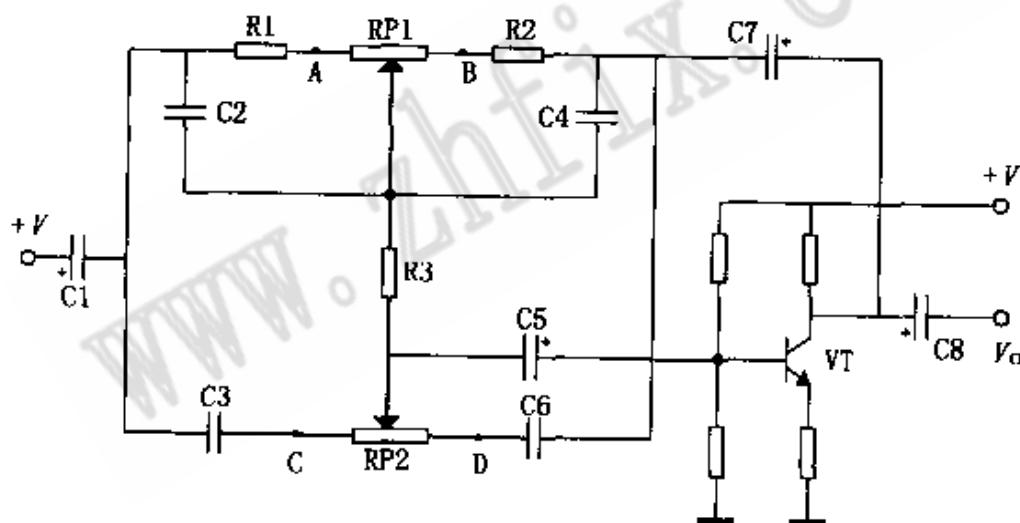


图 2-57 负反馈音调控制电路

低音控制电路由 R1、RP1、R2、C2、C4 及 R3 组成。当 RP1 的动片处于 A 点时，电容 C2 可以视为短路而不起作用。输入信号经 R1、RP1、R3、C5 加到放大管 VT 基极，经放大后由 C8 输出。C7、R2、C4、RP1、R3、C5 组成负反馈网络，由于 RP1 的电阻值全部加入其反馈网络，同时 C4 又对低频信号呈较大的阻抗，因此此时的

负反馈量为最小，放大管 VT 的增益较大，从而使低频相应得到提升。当 RP1 的动片滑向 B 点时，则负反馈网络的负反馈量为最大，从而衰减低频信号。

高音控制电路由 C3、RP2、C5 构成，当 RP2 的动片处于最左边（C 点）时，由输入信号经 C3、RP2、C5 加到放大管 VT 的基极，同时 VT 的集电极的输出信号经 C5 及 RP2 组成的负反馈网络，反馈到 VT 的基极，由于 RP2 的阻值全部在负反馈网络中，此时的负反馈量为最小，因此 VT 放大倍数为最大，从而使高频得到提升。当 RP2 的动片处于最右边（D 点）时，此时 RP2 的阻值全部在输入回路中，负反馈网络的阻抗为最小，即负反馈量为最大，VT 的放大倍数也就最小，从而使高频相应得到最大的衰减。

3. LC 图式音调控制电路

图 2-58 所示为五级调节的 LC 图式音调控制电路。图中 VT 为一只音调控制放大管，RP1~RP5 是音调控制电位器，与每一只电位器相对应的电感和电容组成 LC 谐振网络，从 L1、C1 开始，各个谐振网络的谐振频率分别为 100Hz、330Hz、1kHz、3.3kHz、10kHz。以 RP5 为例，当电位器的动片处于中间与地相连的抽头时，该谐振网络与地短路，此时对 VT 集电极的输出信号中的 10kHz 部分无衰

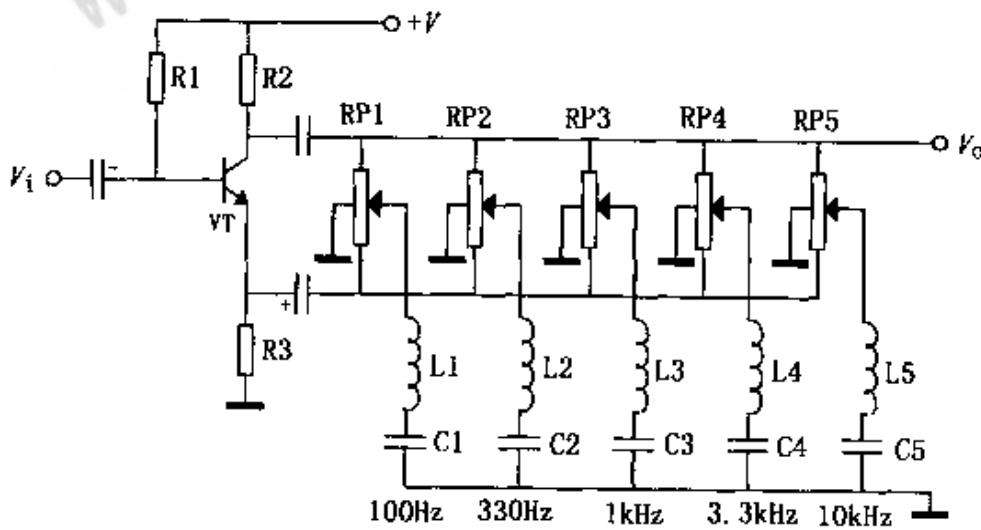


图 2-58 五级调节 LC 图式音调控制电路

减也无提升。当电位器的动片向上移动处于最上端时，L₅、C₅ 的谐振网络对输出信号中的 10kHz 部分所呈现的阻抗很小，使 10kHz 的信号对地分流，同时由于电位器的抽头以下的阻值与 VT 的发射极组成的负反馈电阻不变，使 VT 的负反馈量不变，因此对 10kHz 信号的衰减主要由谐振网络来完成，此时对 10kHz 信号衰减为最大。

当电位器的动片处于最下端时，对于 10kHz 信号 VT 发射极相当于交流接地，因此 VT 的负反馈量也为最小。故 10kHz 信号提升最大。

4. 集成图式音调控制电路

集成图式音调控制电路如图 2-59 所示。图中 IC₁ 为前置放大器中的其中一个声道的放大器，IC_a~IC_e 为五个由运算放大器组成的等效 LC 谐振网络，分别对 100Hz、330Hz、1kHz、3.3kHz、10kHz 五级频率进行控制。当信号从 IC₁ 的正向输入端输入时，IC₁ 的负反馈量受电位器 RP₁~RP₅ 的控制，其工作原理与 LC 图式音调控制电路相同。

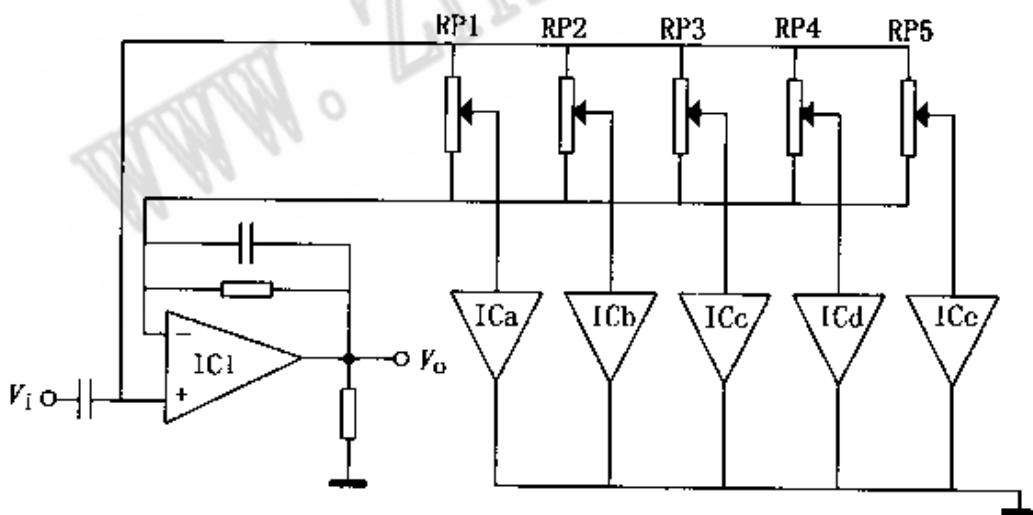


图 2-59 集成图式音调控制电路

IC_a~IC_b 内部的结构相同，主要是各自的阻容元件的参数不同，它们等效于 LC 谐振网络。在实际使用电路中，运算放大器 IC₁ 的反

向输入端与输出端相连接，构成了全负反馈放大器。由于运算放大器的开环增益很高，因此其具有输出阻抗低、输入阻抗高的特点。在实际应用中一般只需改变运算放大器 IC1 的外接电容即可得到各种音调的控制频率。

(四) 响度控制电路

当人们在较大音量的情况下欣赏音乐时，人耳对不同频率所感受的强度基本一致。但是当在小音量欣赏音乐时，由于人耳只对中频部分较为敏感，因而感觉到高低音衰减较大，音质相对变差。响度控制电路的作用是当音量减小时对高低音进行补偿，以弥补人耳的听觉不足。

响度控制电路主要有 RC 响度控制电路、音量电位器带抽头的响度控制电路和 LC 响度控制电路三种，其电路形式如图 2-60 所示。其中图 (b) 为音量电位器带抽头的响度控制电路，K 为响度控制开关。当音量较小时，K 打在 ON 位置，输入信号中的高频部分由于 C1 的容抗较小，经过 C1 及 RP 的中间抽头后直接送至后级功放电路，高频部分没有经过衰减，因而得到相对的提升。对于输入信号的中低频部分，由于 C1 所呈现的容抗较大，相当于在 C1 处开路，因而只能通过 RP 到达其动片。在 RP 的抽头与地之间接有一

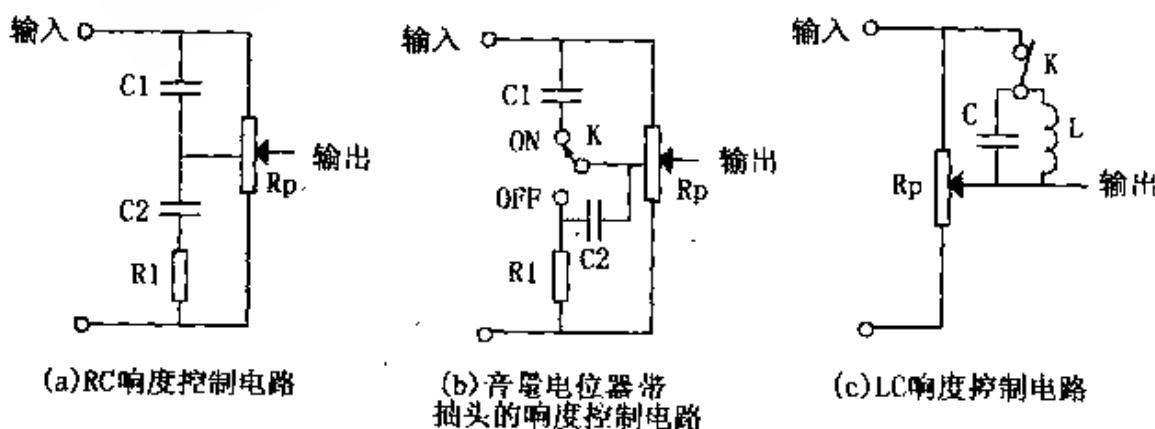


图 2-60 响度控制电路的三种形式

RC 低频提升串联网络，该网络对中频信号呈较小的阻抗，对中频信号进行分流衰减，而对于小于该网络转折频率的低频信号呈现较大的阻抗，从而使低频相应得到提升。当 K 的位置处于 OFF 时，响度电路关闭，无高低音补偿作用。

三、功率放大器保护电路

功率放大器中的保护电路主要是为了保护功率放大器的功率放大输出管，使其在电路出现故障时而不被击穿损坏。一般功率放大器中主要设有过压保护和过载保护，在有些功率放大器中还设置了过热保护。

图 2-61 所示为功率放大器的过压保护电路。图中 VT1、VT2 分别为两只功率放大输出管，VD1 和 VD2 为两只保护管（稳压二极管）。在选择 VD1 和 VD2 击穿电压时，其数值略大于直流工作电源的工作电压，当功率放大器处于正常的工作状态时，VD1 和 VD2 处于开路状态，它对功率放大电路无任何影响。当输入功率放大器的工作电压因故上升时，其电压的数值大于 VD1 和 VD2 的击穿电压，此时 VD1 和 VD2 便被击穿，钳制工作电源的电压，使其不再上升，从而保护了功率输出管。

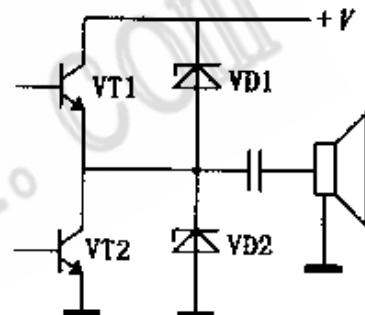


图 2-61 功率放大器的过压保护电路

图 2-62 为一限流式过载保护电路。图中 VT3、VT4、VT5 及 VT6 构成了功率放大器的互补对称输出电路；VT1、VT2、VD1 及 VD2，电阻 R8 及 R9 则构成了限流式过载保护电路。当功率放大管 VT5 和 VT6 工作时，其工作电流必须流经电阻 R8 和 R9，并可能通过电阻 R6 和 R7 加至 VT1 和 VT2 的基极，使其导通而进入工作状态，但是在选取 R8 和 R9 阻值时，应使其阻值很小，这样工作电流流经 R8、R9 时，在上面所产生的电压降也很小，该电压经过 R6 和

R7 输送至 VT1 和 VT2 管的基极，但并不能够使其导通，故当 VT5 和 VT6 正常工作时，VT1 和 VT2 对放大电路不起任何作用。如果当负载出现短路等故障时，流经 VT5、VT6 的电流大增，则流经 R8、R9 的电流也增大，从而在上面产生的电压降也增大，该电压通过电阻 R6、R7 加 VT1 和 VT2 的基极，使两管导通，从而对输入 VT3 和 VT4 的电流进行分流，减小进入 VT3 和 VT4 信号的幅度，起到保护功率放大管的目的。

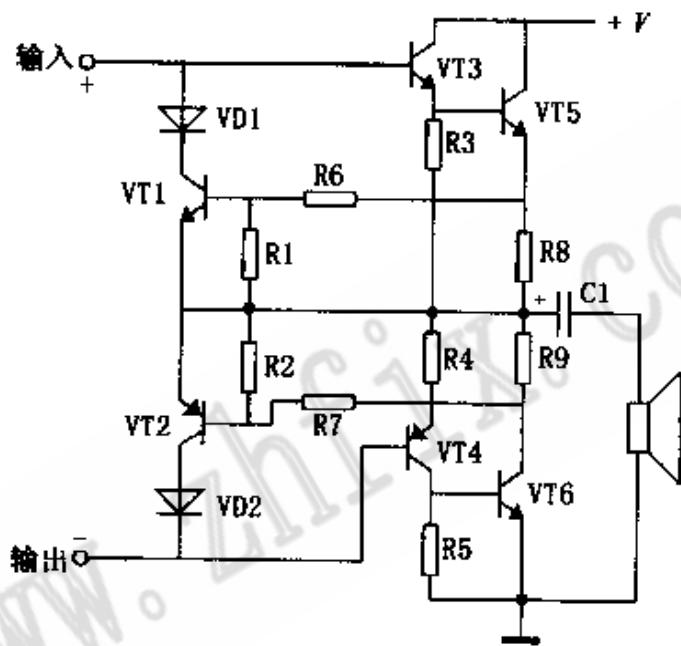


图 2-62 限流式过载保护电路

电路中 VD1 和 VD2 的作用是当功率放大管正常工作时，使 VT1 和 VT2 的集电极处于反向偏置状态。改变电阻 R7、R8 的阻值可改变保护电路在何种电压值的状态下进行动作而进入保护状态。

四、DSP 声场处理电路

DSP 系统全称为“数码声场处理技术”(Digital Sound Field Processing)。它是由日本雅马哈公司 20 世纪 80 年代研制生产的专门用于产生与演奏现场实况相似效果的新型声场处理系统。雅马哈

公司对声场研究主要针对于演奏现场的各种声场要素而进行，他们通过对直达声和反射声、一次反射声、延时混响声、阻尼因素等技术指标的研究，采用专用的“单点四芯导线麦克风测量”（Single Point Quad Miking）方法，采集影剧院、大型体育场、教堂、歌舞厅等各种现场实况的声场的（如直达声、反射声、混响声等）数据，再通过计算机对所采集的数据进行分析，得到声场处理的系统软件，然后将其固化到 DSP 处理芯片中。重放时，欣赏者只要调出相应节目内容的演奏现场声场的资料数据，就可以较方便地模拟各种现场的效果。因此在已具有了杜比定向逻辑解码器的信号中，再加入 DSP 的现场感信号，其营造的声场将会使欣赏者得到身临其境的享受，比如：在模拟流行/摇滚音乐会的声场时，重放声场活泼，具有动感；在模拟 70 毫米惊险电影的声场时，重放的声场空间感较强，具有纵深、宽广的特点。

图 2-63 为雅马哈 DSP 声场处理系统 YSS214 模块的内部方框图。“雅马哈 DSP-A3090”内部的 DSP 声场处理系统就是采用了 YSS214。

目前，AV 功率放大器中的集成电路，特别是一些解码模块均采用了表面安装技术，手工制作 AV 功率放大器时，表面焊接技术是很难达到焊接要求的。因此，音响爱好者在制作 AV 功率放大器时，应尽量采用一些不采用表面安装技术或引脚数较少的解码集成电路，以免引起不必要的损失。

五、卡拉OK 电路

目前大多数功率放大器上都设置了卡拉OK 混响电路，目的是为了方便一般家庭在欣赏音乐的同时，还可以自娱自乐。卡拉OK 混响电路有独立的器材，也有加在功率放大器的前置放大电路中。卡拉OK 混响电路的方框图如图 2-64 所示。它是将输入的信号经过延时后再送入延时电路的同相输入端，形成正反馈振荡，该正反馈振

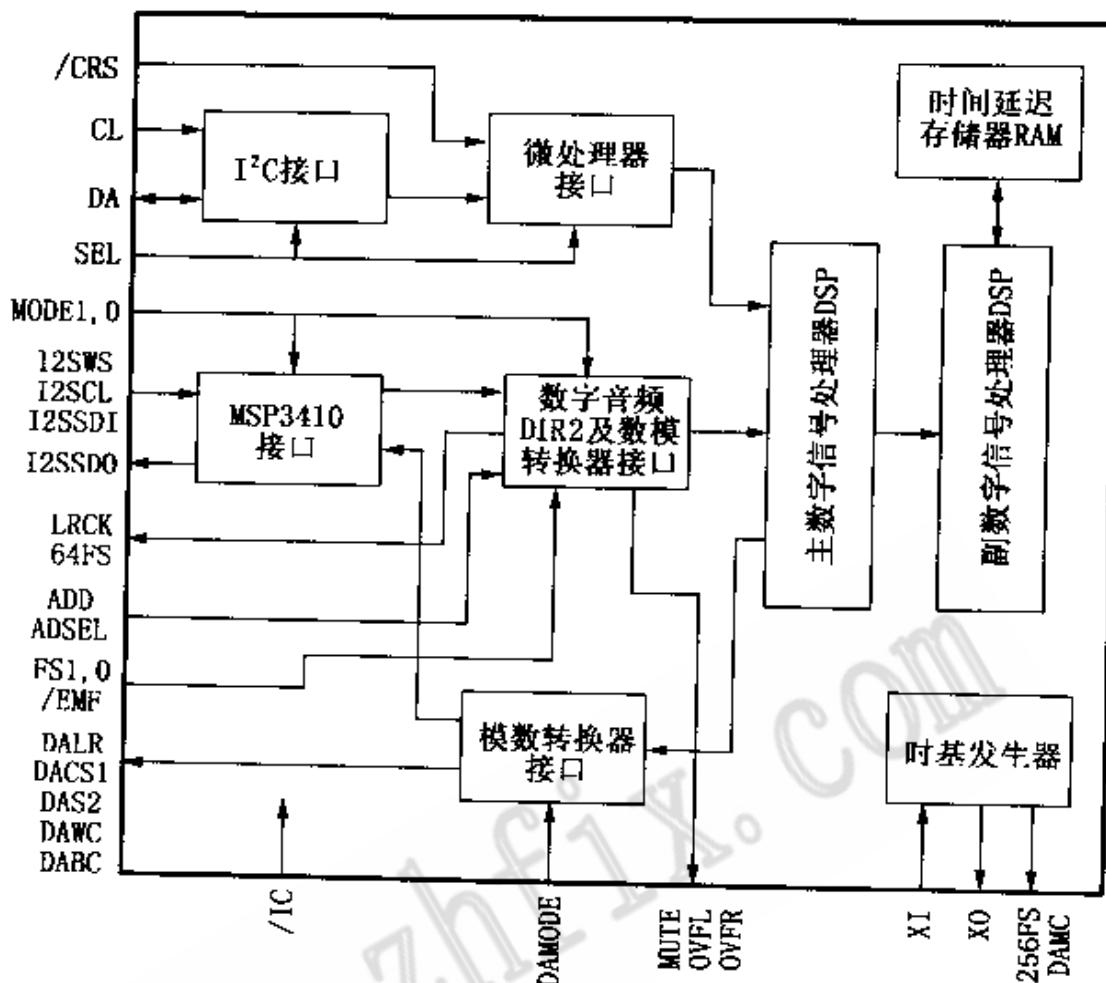


图 2-63 YSS214 模块的内部方框图

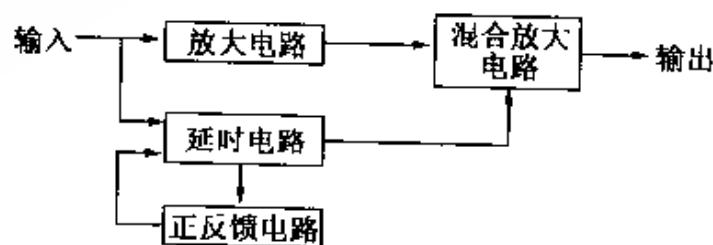


图 2-64 卡拉OK 混响电路的方框图

荡即是所需要的人为“反射声”，然后再将该延时后的信号送入混合放大电路，就可以产生重放声的延时混响效果。

人工混响器一般可分为机械混响和电子混响两种。机械混响主

要是利用钢板、混响室等手段来达到混响的目的，但较为复杂。由于电子混响器制作较为容易，且具有频响宽、失真小、噪声低、延时长等特点，因此被广泛作为卡拉OK的混响器材。

图 2-65 为数字式混响器的电路方框图。输入信号经过低通滤波器滤除高频成分后，送入 A/D 转换器将模拟信号转换成数字信号，该数字信号存储于动态存储器中，其延时时间的长短由 CPU（微处理器）控制，经过一定的延时后，再经过 D/A 转换器和低通滤波器将数字信号转换成模拟信号，这样输入信号就被延时了一段时间。

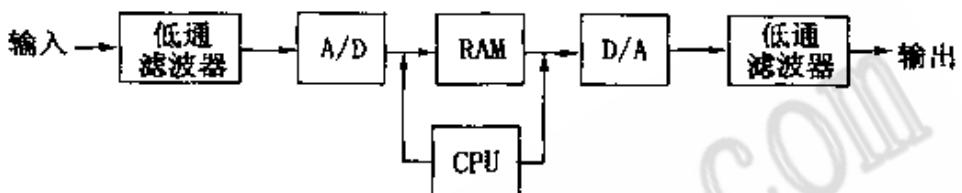


图 2-65 数字式混响器的电路方框图

数字延时混响器的延时时间由 CPU 的取样频率和动态存储器的容量来决定，它的延时效果比 BBD 延时电路提高了很多。

图 2-66 为国产“天逸”AD-580 卡拉OK 混响器的电路原理方框图。以左声道为例，输入的各种信号源的音频信号首先经过信号源选择切换电路，选择出所需要的音源信号进入歌声消除电路，经过消歌声处理后输出纯音乐信号，该信号经过音乐音量的控制后再进入由 A1 及其外围电路组成的音调控制电路，进行高、低音控制，然后进入 K1 与右声道信号相混合后输送至放大器 A2 进行放大，再与话筒信号相混合后进入放大器 A3 放大，然后作为线路信号的输出。

电路中 K1 的作用是保证前级和当机器对音乐信号不作变调处理时，工作于双声道状态，K1 的工作状态受机器工作模式的控制。

当机器处于卡拉OK 模式工作时，一路话筒信号 MIC1 和二路话筒 MIC2 及 MJC3 的混合信号分别经过放大器 A4 和 A5 进行放

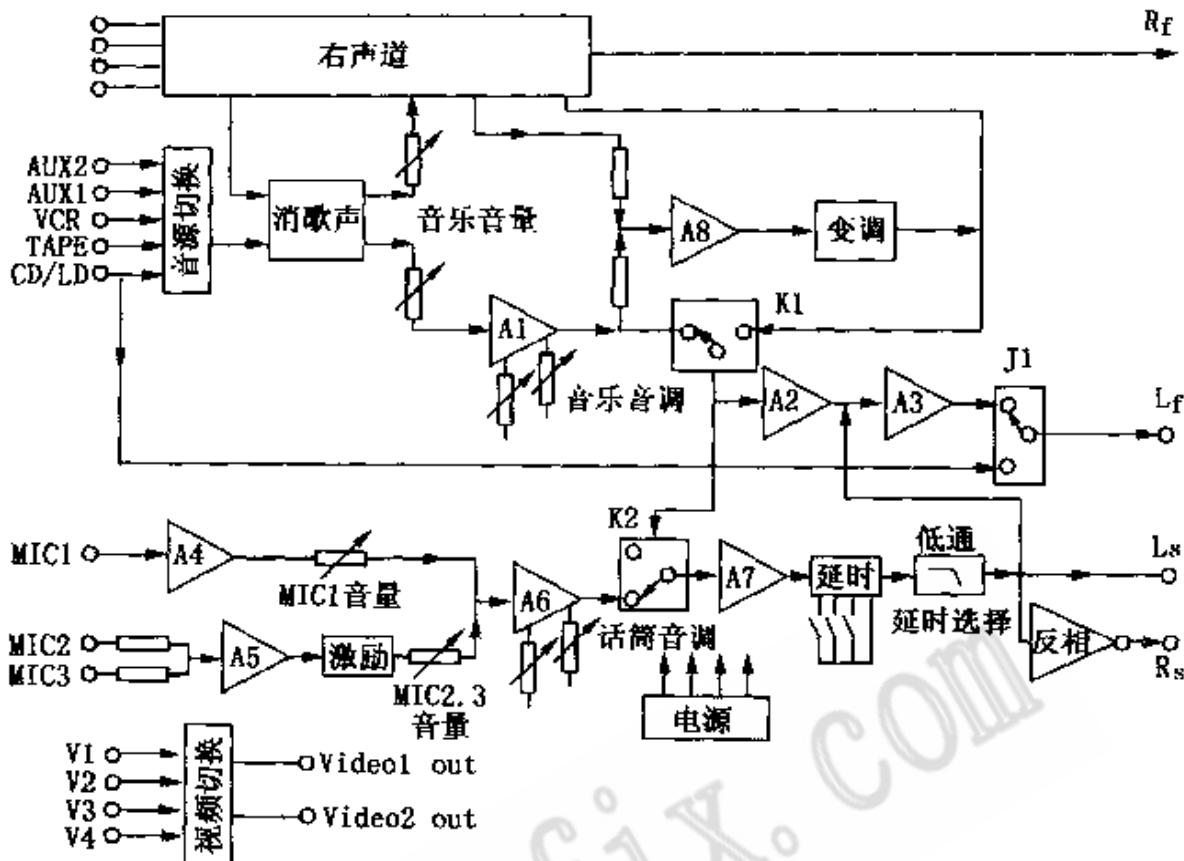


图 2-66 国产“天逸”AD-580 卡拉OK 混响器的电路框图

大后, MIC1 的信号经过音量控制后进入由 A6 及其外围电路组成的音调控制电路, 进行音调的调节控制。MIC2 和 MIC3 的信号与 MIC1 不同, 它还得经过激励电路激励, 并进行音量控制后再进入 A6。经过 A6 处理后的三路话筒混合信号经过 A7 放大后输入混响延时电路进行处理, 得到经过混响延时后的信号再经过低通滤波器输送至 A3 与音乐伴奏信号相混合后输出。

如果机器处于环绕声重放模式工作时, 音乐伴奏信号分为两路, 一路经过 A1 放大并经过 K1 切换后, 直接由 A2 和 A3 放大后输出至 L_f 端, 而另一路则经过 K2 切换后进入混响延时电路, 经过混响延时处理后再经过一反相器进行反相, 从 R_s 端输出, 从而得到一个经过延时的模拟右声道环绕声信号, 供右声道环绕音箱重放。

第四节 印刷电路板制作与元器件布局

一、印刷电路板的类型

印刷电路板按其结构可分为以下五种。

1. 单面印刷电路板

单面印刷电路板是在厚度为0.2~5.0mm的绝缘基板上，一个表面敷有铜箔，通过印制和腐蚀的方法，在基板上形成印刷电路。它适用于一般要求的电子设备，如收音机、电视机等。

2. 双面印刷电路板

双面印刷电路板是在绝缘基板上(其厚度为0.2~5.0mm)两面均敷有铜箔，可在基板的两面制成印刷电路。它适用于一般要求的电子设备，如电子计算机、电子仪器、仪表等。双面印刷电路的布线密度较高，所以能减小设备的体积。

3. 多层印刷电路板

多层印刷电路板是在绝缘基板上制成三层以上印刷电路。它是由几层较薄的单面板或双层面板粘合而成，其厚度一般为1.2~2.0mm。为了把夹在绝缘基板中间的电路引出，多层印刷板上安装元件的孔需要金属化，即在小孔内表面涂覆金属层，使之与夹在绝缘基板中间的印刷电路接通。其特点是：与集成电路块配合使用，可以减小产品的体积与重量；可以增设屏蔽层，以提高电路的电气性能。

4. 软印刷电路板

软印刷电路板的基材是软的层状塑料或其他质软膜性材料，如聚酯或聚酰亚胺的绝缘材料，其厚度为0.25~1mm之间。它也有单层、双层及多层之分，它可通过端接、排接到任意规定的位置。因此被广泛用于电子计算机、通信、仪表等电子设备上。

5. 平面印刷电路板

平面印刷电路板是将印刷电路板的印制导线嵌入绝缘基板，与基板表走齐，一般情况下在印制导线上都电镀一层耐磨金属。通常用于转换开关、电子计算机的键盘等。

印刷电路板按材料的不同可分为以下四种。

1. 酚醛纸基敷铜箔板（又称纸铜箔板）

它是由纸浸以酚醛树脂，两面衬以无碱玻璃布，在一面或两面覆以电解铜箔，经热压而成。这种板的缺点是机械强度低，易吸水及耐高温较差，但价格便宜。

2. 环氧酚醛玻璃布敷铜箔板

它是由无碱玻璃布浸以酚醛树脂，并覆以电解紫铜，经热压而成。由于用了环氧树脂，故粘结力强，电气及机械性能好，既耐化学溶剂，又耐高温耐潮湿，但价格较贵。

3. 环氧玻璃布敷铜箔板

它是由玻璃浸以双氰胺固化剂的环氧树脂，覆以电解紫铜箔经热压而成。它的电气及机械性能好，耐高温耐潮湿，且板基透明。

4. 聚四氟乙烯玻璃布敷铜箔板

它是由无碱玻璃布浸渍聚四氟乙烯分散乳液，覆以经氧化处理的电解紫铜箔，经热压而成。它具有优良的介电性能和化学稳定性，是一种耐高温、高绝缘的新型材料。

二、印刷电路板的设计

印刷电路板的设计，是根据设计人员的意图，将电原理图转换成印刷板图，确定加工技术要求的过程。在保证要求的工作条件下，印刷电路板具有满意的性能和可靠性。

一般较正规的印刷电路的设计主要有以下几个方面的步骤：

（一）电路设计

由电路设计人员提供原理图、逻辑图、元件表、成品技术要求，

并要考虑电阻电流、电压及导线间的电容等。

(二) 封装设计

封装设计即印制导线设计。它可分为三个阶段：一是决定印制板的尺寸、形状、材料、外部连接和安装方法；二是布设导线和元件，确定印制导线的宽度、间距和焊盘的直径和孔径；三是制备照相底图。

印刷电路板设计通常有两种方式：一种是人工设计，另一种是计算机辅助设计(CAD)。无论采取哪种方式，都必须符合电原理图的电气连接和电气、机械性能要求。

在着手设计印制电路板时，设计人员应依据有关规则和原理、推荐标准、指导性技术文件进行设计。技术文件中说明了一系列电路板尺寸、层数、元件尺寸、坐标网格的间距、样接元件的排列间隔、制作印制电路板图形的工艺等。

对于一般音响爱好者来说，一般已有设计好的印刷电路图，若无现成的印刷电路图，可通过以下的印制电路板元器件布局与布线的方法简单地对印刷电路进行设计。

三、印刷电路板元器件布局及布线

(一) 印刷电路板元器件布局

通常元器件布置在印刷板的一面。此种布置便于加工、安装和维修。对于单面板，元器件只能布置在没有印制电路的一面，元器件的引线通过安装孔焊接在印制导线的焊盘上。双面板主要元器件也是安装在板的一面，另一面可有一些小型的零件，一般为表面装贴元件。在保证电性能要求的前提下，元器件应平行或垂直于板面，并和主要板边平行或垂直，在板面上分布均匀整齐。一般不得将元件重叠安放，如果确实需要重叠，就应采用结构件加以固定。

元件尽可能有规则地排列，且元器件的极性最好以一致的方向排列，如图 2-67 所示。各元器件之间一般以 2.5~3mm 的间距为宜，

以得到均匀的组装密度。大功率元件周围还应在布置热敏元件，和其他元件要有足够的距离。较重的元件应安排在靠近印刷电路板支撑点处。元件排列的方向和疏密要有空气对流。元器件宜按电原理图顺序成直线排列，力求紧凑以缩短印制导线长度。如果限于板面尺寸，或屏蔽要求而必须将电路分成几块，就应使每一块印刷板成为独立的功能电路，以便于单独调整、测试和维修。这时应使每一块印刷板的引出线为最少。

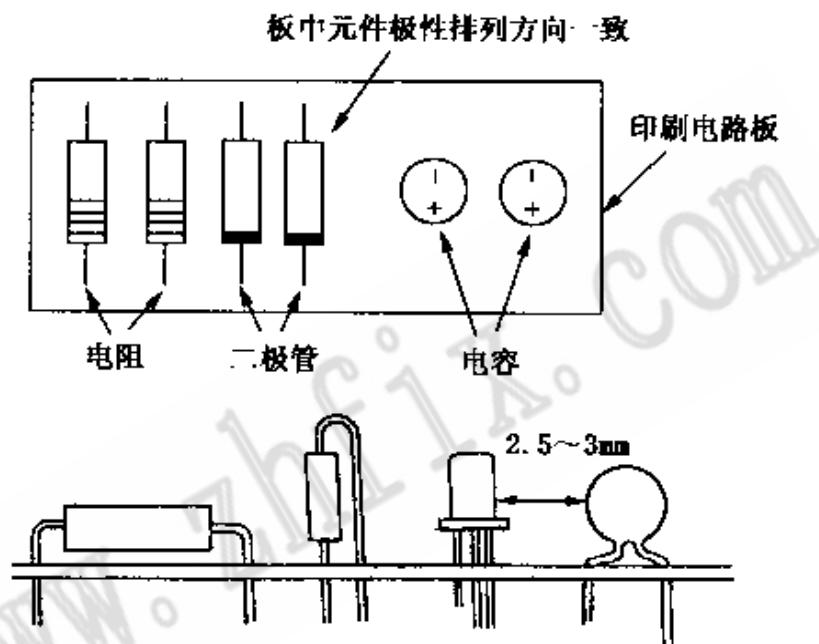


图 2-67 印刷电路板中元器件布局

为使印刷板上的元器件的相互影响和干扰最小，高频电路和低频电路、高电位与低电位电路的元器件不能靠得太近。元器件排列方向与相邻的印制导线应垂直交叉。特别是电感器件和有磁心的元件要注意其磁场方向。线圈的轴线应垂直于印刷板而，以求对其他零件的干扰最小。

考虑元器件的散热和相互之间的热影响，发热量大的元器件应放置在有利于散热的位置，如散热孔附近。元件的工作温度高于40℃时应加散热器。散热器体积较小时可直接固定在元件上，体积

较大时应固定在底板上。在设计印刷板时要考虑到散热器的体积以及温度对周围元件的影响。

提高印刷板的抗振、抗冲击性能。要使板上的负荷分布合理，以免产生过大的应力。对大而重的元件尽可能布置在靠近固定端，或加金属结构件固定。如果印刷板比较狭长，就应考虑用加强筋加固。

(二) 印刷电路板的布线

制作者自己动手设计印刷电路板，在设计其布线时，一般可将低频导线靠近印刷板边布置，将电源、滤波、控制等低频和直流导线放在印刷板的边缘。公共地线应布置在板的最边缘。高频线路放在板面的中间，可以减小高频导线对地的分布电容，也便于板上的地线和机架相连。高电位导线和低电位导线应尽量远离，最好布线是相邻的导线间的电位差最小。布线时应使印制导线与印刷板边留有不小于板厚的距离，以便于安装和提高绝缘性能。

避免长距离平行走线。印刷电路板上的布线应短而直，减少平布线。必要时可以采用跨接线。双面印刷板两面的导线应垂直交叉。高频电路的印制导线的长度和宽度宜小，导线间距要大。

不同信号系统应分开。印刷电路板上同时安装模拟电路和数字电路时，宜将这两种电路的地线系统完全分开，它们的供电系统也要完全分开。

采用恰当的接插形式，有接插件、插接端和导线引出等形式。输入电路的导线要远离输出电路的导线。引出线要相对集中设置。布线时输入输出电路分列于电路板的两边，并用地线隔开。

设置地线。印刷电路板上每级电路的地线一般应自成封闭回路，如图 2-68 所示，以保证每级电路的地电流主要在本地回路中流通，减少级间地电流耦合。但印刷板附近有强磁场时，地线不能做成封闭回路，以免成为一个闭合线圈而引起感生电流。电路的工作频率越高，地线应越宽，或采用大面积布铜。

对于整机的地线，一般有二种方法，即：串联一点接地法和并

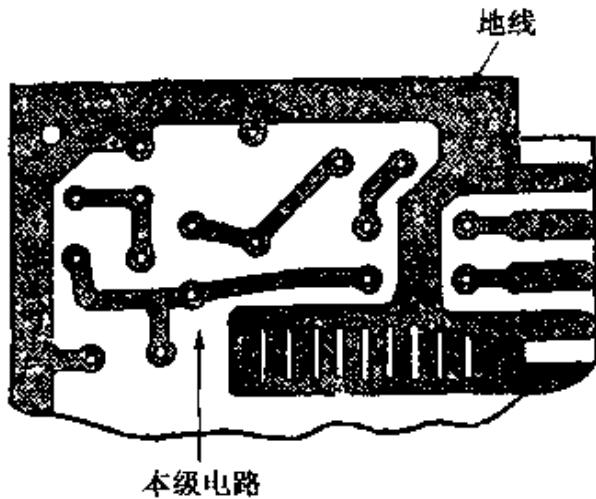


图 2-68 印刷电路板地线的布局

联一点接地法。所谓串联一点接地法是将各级放大电路按先后顺序将接地点汇集于一条总的地线上，然后在一端接地（机器的外壳），如图 2-69 (a) 所示。这种方法较适合于印刷电路板，此时电路板上应分别给出输入和输出的地线点。由于任何接地线都有电阻存在，当放大器中的电流流过时会产生一定的压降，从而产生干扰，故接地的电阻应尽可能小。至于在电路的输入端还是输出端接地，可根据实际试机决定，如果只是对于抑制自激而言，就将接地点设在电路的输出端。

并联一点接地如图 2-69 (b) 中所示，各电路的地电位只与本电路的地电流和地线的电阻有关，这对避免各级放大电路的地电流的耦合，减少干扰是很有利的。但是这种接地方法也有一些缺点，由于功率放大器有几级放大电路，故接地线较多，而接地线较长会产生较大的分布电感，对重放信号的高频瞬态响应有一些影响。

图 2-70 为一接地实例。图中电容 C 为滤波电容，C 两端的瞬时电压 u_C 和充放电流 i_C 如图 (c) 所示。图 (a) 中滤波电容 C 的接地端接至放大器的输入端接地点 A，这样就使电容 C 的充放电电流 i_C 通过了印刷电路板，从而使干扰电压与信号的输入电压相叠加，经

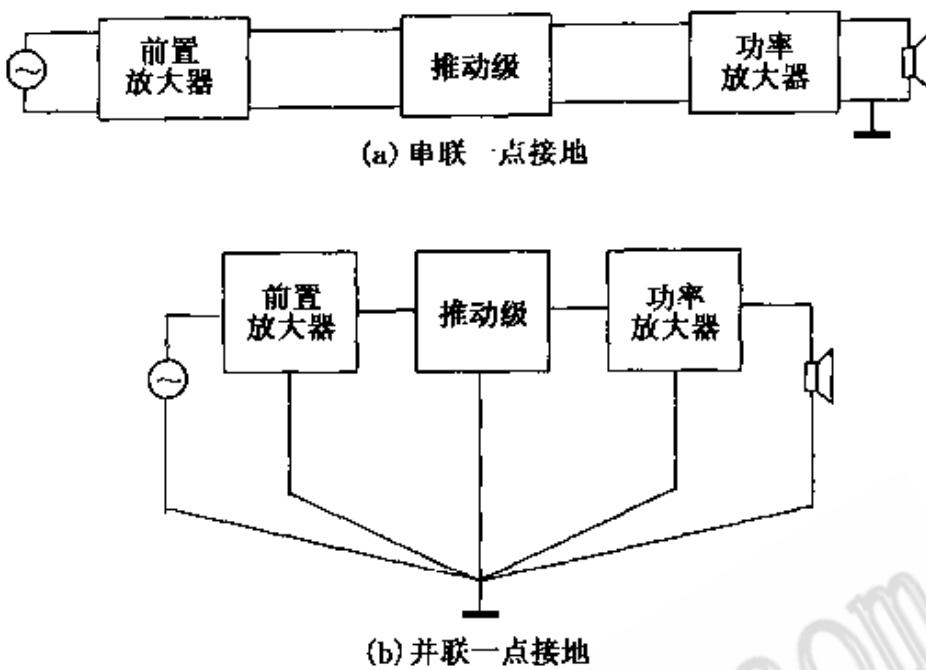


图 2-69 整机接地方式

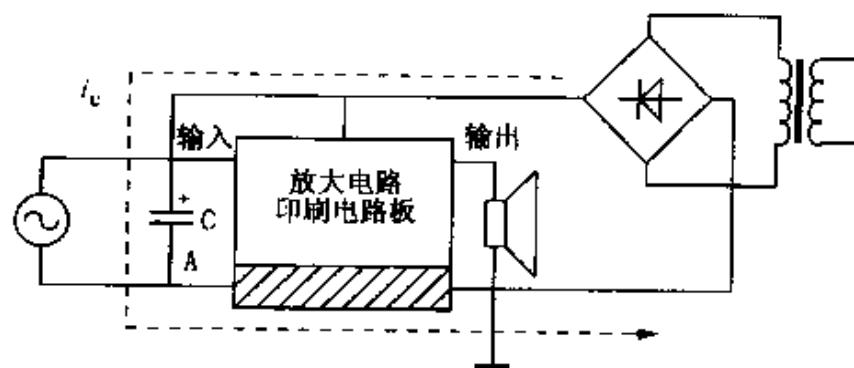
过放大电路放大后将产生严重的交流噪声。

图 (b) 也是一种错误的接地方式, 信号源的接地端没有接至印刷电路板的输入端的接地点, 为了方便只是将它与扬声器和电源的接地端各自就近与机壳相连接, 这样电容 C 的充放电电流 i_C 在导线 MN 上产生的干扰电压降同样会与信号的电压相叠加, 经过放大器放大后, 也将产生交流噪声。

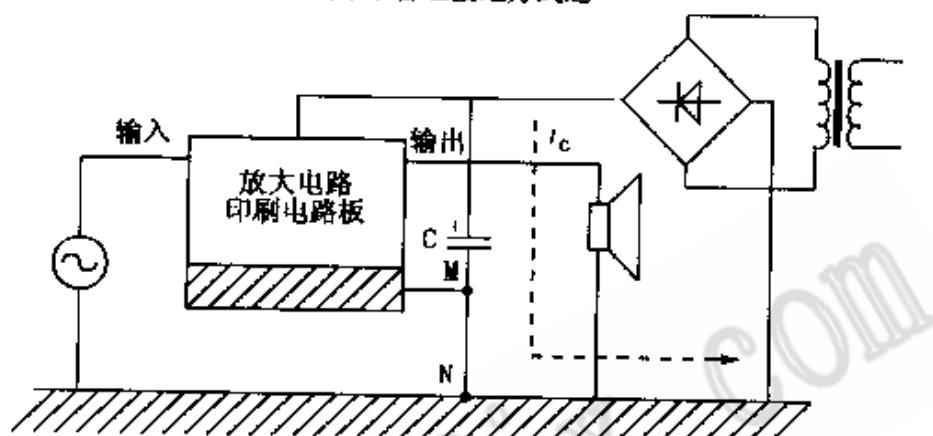
上述示例正确的接地方法如图 (d) 所示。

在制作功率放大器的过程中, 出现低频自激大都是由于接地不良所致, 这一点须特别注意。

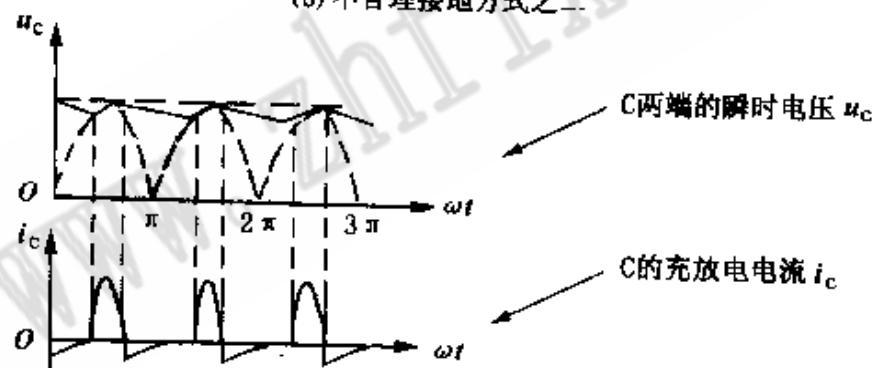
另外, 功率放大器中金属屏蔽线的接地也需要注意, 如图 2-71 所示。一般不宜将金属屏蔽线的两端均接于前后级的电路地上, 这样会使金属屏蔽层形成地电流的通路, 从而产生不必要的噪声, 通常的做法是将金属屏蔽层的一端接地, 且接于后级放大电路的地面上。



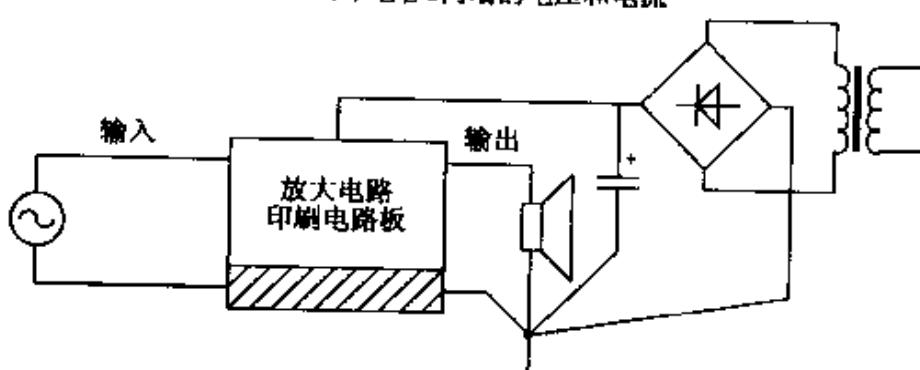
(a) 不合理接地方式之一



(b) 不合理接地方式之二



(c) 电容C两端的电压和电流



(d) 正确接地法

图 2—70 几种不合理的接地方式

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。

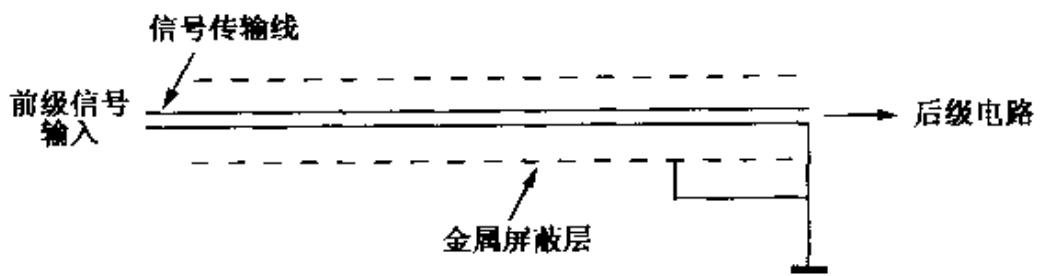


图 2-71 功率放大器中金属屏蔽线的接地方式

四、印刷电路板的制作

设计绘制好印刷电路板后紧接着的程序是制作印刷电路板，具体制作步骤如下：

(1) 按尺寸要求用钢锯或刻刀裁制大小适合的印刷电路基板(俗称敷铜板)。裁好后要用美工刀把基板边线打磨光滑。

(2) 印刷电路板存放时间长了自然有污垢，为保证腐蚀质量，需要进行清洗。方法是用布或刷子蘸上去污粉或洗衣粉，加少许水，在印刷电路板的铜箔面上来回洗擦，以去掉板上的油污，洗擦完毕用水冲洗干净，再用布揩干。

(3) 用复写纸把已绘制好的印刷电路复印到敷铜板的铜箔面上。如用“涂漆”法，各印刷板导线可用竹筷子削成粉铅笔状来描图，其余图案用硬铅笔或圆珠笔复写。如用“贴胶”法，可用铅笔将原印刷电路的单线图复写下即可。全部复印后应再检查一下电路板上有没有遗漏的地方。

(4) 许多人习惯将钻孔放在最后一道工序，但一般来说钻孔工序放在复印好电路板后进行较好，因为刚复印的图钻孔位置清晰可见。此时钻孔，孔位准确，确保孔位排列整齐。若钻孔放在最后一道工序，板上只留下焊盘的圆点，难以找出其圆心位置，钻孔难以整齐排列，尤其是对于多脚且密集的集成电路，更难钻得准确，给

安装带来很大的困难。钻孔可用手摇钻、手电钻或台钻进行，根据所在元件引线的粗细选用不同规格的钻头，一般小型元件引线用 $\varnothing 1\text{mm}$ 的钻头即可。其他较粗引线可按实情选用不同直径的钻头。若用台钻钻孔，为了让孔的质量提高，应磨快钻头并用较高的转速（如1000转/分以上）。钻孔完毕将钻后凸出板面的毛刺磨平，但要注意不要将敷铜面磨薄了。

(5) 描板就是将复印好的图用防腐蚀材料覆盖好。早期最常用的方法是涂漆法，它采用小毛笔或夹扁了头的蘸水钢笔作描绘工具，蘸油漆描绘。所用油漆要稀稠适当，如油漆太稠，可加稀料（如天那水）稀释。电路板图案描好后，待油漆干透后再用美工刀修除边缘不整齐的线段。

另外，还有一种方法是“胶粘法”，即将不干胶附在图纸上，使用时将其从纸上撕下直接粘于复印好的单线图贴上；印制线段则像电工胶布似的成卷状，使用时也可直接撕下按图贴上即可。在贴图时也应考虑不同的元件引线粗细选用不同规格的焊盘，印制线段也应按实际情况选用宽窄度。除此之外还要注意贴图技巧，务必使圆焊盘与印制线段衔接严密，否则会出现焊盘与印制线断裂现象，为了避免这种现象出现，贴图时印制线段要与焊盘相重叠一小面积，或在贴好图后用油漆在衔接部位涂上油漆。用“贴胶法”制出的板整齐美观，但制作价格比“涂漆法”高。

(6) 描好板后即进行印刷电路板的腐蚀，最常用的腐蚀剂是三氯化铁(FeCl_3)，在市面出售的一般有液体和固体两种。如果是液体的三氯化铁，则可用一个大小适合的瓷盆、搪瓷盆（有破损露出金属物的不能用）或塑料盘盛上 FeCl_3 ，即可放入已制好的印制板进行腐蚀。如果是固体的三氯化铁，则需要用水稀释。合适的浓度配置：100g块状三氯化铁加入200ml的水，待固体完全溶解后即可放板腐蚀。腐蚀时，以液体量浸过板面为宜，腐蚀的时间与溶液的浓度和温度有关，浓度大、温度高，所需腐蚀时间就短，反之则长。在腐

蚀过程中可不断用毛笔轻轻涂擦铜箔面，扫掉反应生成的沉淀物（这样会加快腐蚀），并要不停观察，只要裸露的敷铜层已腐蚀干净，便应把印刷电路板取出，用清水洗净。

(7) 已腐蚀好的印刷电路板，如果是贴胶的，则将胶条撕下即可。如果是涂漆的，可用布或棉丝蘸上油漆稀料（天那水）擦去保护漆，印制电路板便显露出来，最后还要检查一下印制电路之间有没有未腐蚀干净的毛刺，若有，应用小刀把它剔除，以防短路。

(8) 最后一道工序是给印刷电路板涂上助焊剂。将去漆后的板用清水冲洗干净，用布揩干，并用细砂纸把铜箔面擦亮，再用布擦去粉末，随即涂上助焊剂，可保护铜箔面免遭氧化，便于焊接。最常用的助焊剂是松香酒精溶液，每100ml加入30~40g粉状松香，待松香完全溶解后，即成助焊剂。涂助焊剂可用小毛笔或棉球进行。

这样一块完整的印刷电路板即制作完成，下一步即可进行元件的焊接了。

五、元器件的焊接工艺

焊接质量的好坏对于功率放大器工作的可靠性有很大的影响，手工焊接是利用电烙铁实现金属之间牢固连接的一项工艺技术。这项工艺看起来很简单，但要保证高质量的焊接却是相当不容易的，因为手工焊接的质量受诸多因素的影响及控制，必须大量实践，不断积累经验，才能真正掌握这门工艺技术。

手工焊接的工艺流程如下：准备→加热→加焊料→冷却→清洗→检验。

准备：焊接前必须做好焊接的准备工作，它包括焊接部位的清洁处理，预焊，元器件引线的成形及插装，焊接工具及焊接材料的准备，使连接点处于随时可以焊接的状态。

加热：就是用烙铁头加热焊接部位，使连接点的温度加热到焊接需要的温度。在加热中，热量供给的速度和最佳焊接温度的确定

是保证焊接质量的关键。通常焊接温度控制在 260℃ 左右。但考虑电烙铁在使用过程中的散热，可把温度适当提高一些，控制在 300℃ 左右。

加焊料：当烙铁加热到一定的温度后，即可在烙铁头和连接点的结合部或烙铁头对称的一侧，加上适量的焊料，焊料量的多少，应使导线的外形保持可见或保证能够覆盖连接点。

在施焊过程中，要求操作者针对不同的焊接对象，掌握正确的焊接时间。通常焊接时间控制在 2~3s 之内。

冷却：焊接结束之后，将焊料和烙铁头撤离，让焊点自然冷却，不要用嘴吹或其他强制冷却的方法，以免影响焊点的形成，在焊料凝固过程中，连接点不应受到任何外力的影响而改变位置。

清洗：焊接完成之后，必须进行清洗，除去残留在焊点周围的焊剂，油污等，以防残留物的污染及腐蚀，并使焊点清洁美观。

第三章 功率放大器调试、检测与故障检查

第一节 功率放大器的调试

制作完成后的功率放大器的直流工作点均需要进行相应的调整，使其工作于最佳的状态。经过修理或更换了末级功率放大对管后的功率放大器，其直流工作点会产生一定的偏移，此时同样需要对其直流工作点等项目进行重新调整。这里主要介绍一下最常见的OTL 及 OCL 功率放大电路的直流工作点的调整方法。

一、OTL 功率放大电路的调试

图 3-1 为一 OTL 功率放大电路。OTL 电路的调整内容主要有平衡调整和功率输出管静态偏置调整两项。在调整 OTL 电路之前，首先应将音量电位器关至最小的位置。进行平衡调整的目的主要是调整输出晶体管的中点工作电压。OTL 电路正常工作时，输出晶体管的中点电压应为电源工作电压的 $1/2$ 。将万用表接于图示电路中的 a 点，调整电路中的可调电阻 VR1，使 a 点的电压值为电源供给电压的 $1/2$ 即可。若在调整过程中，调节 VR1 后，a 点的电压值始终达不到电源供给电压的 $1/2$ ，则说明电路中存在故障，应在故障排除后，再进行调整。

OTL 功率放大电路存在放大交流信号的交越失真现象，因此要通过对 OTL 电路输出功率管静态偏置的调整，使其在静态时有一个较小的偏置电流。在调整时，取下电路中的保险丝，在电路中串接一万用表，将其挡位置于直流 mA 挡，调整电路中的可调电阻

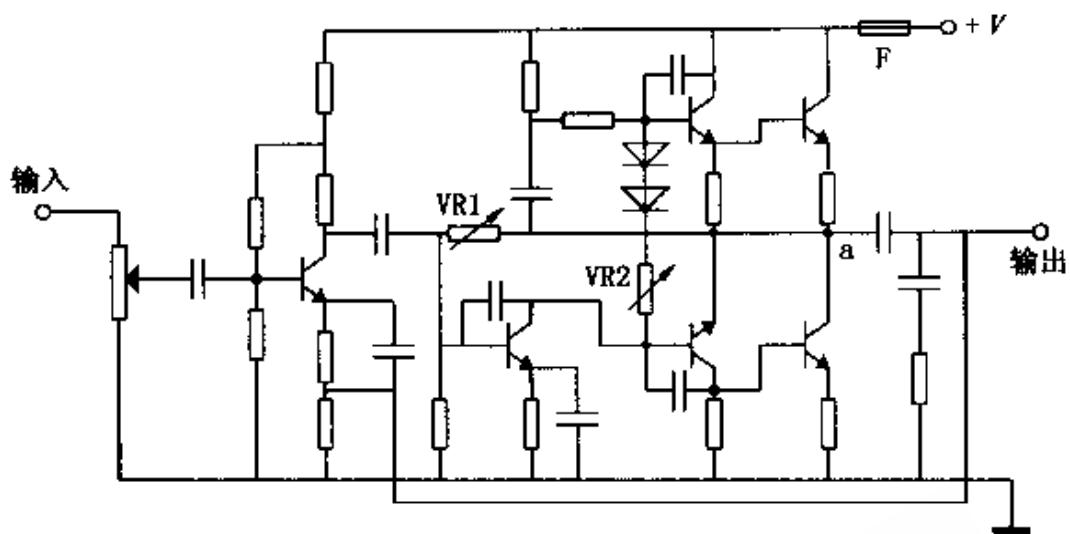


图 3-1 OTL 功率放大电路

VR2，使其在阻值较小的位置，此时的电流读数即为电路输入级和推动级的工作电流，然后再逐渐调节 VR2，使万用表的电流读数为原读数的基础上再加上 10mA 左右即可。若调节 VR2 不能够使电流读数达到正常的数值，说明电路存在故障，需要将故障排除后，再进行调整。

二、OCL 功率放大电路的调试

OCL 功率放大器的调整也较为简单，一般可在功率放大器的输出端接上一个和扬声器阻抗相同的假负载（负载电阻），然后接通电源，调整可调电阻，使输出管的静态电流达到一定的值，然后再检测一下中点的电位对地是否为零，以防止过大的直流电流流过负载，调整完毕接上扬声器即可进行重放。

图 3-2 为一 OCL 功率放大电路。OCL 与 OTL 放大电路不同的是其供电电源为正负对称电源，对其调整主要有输出管中点电压的调整和输出管静态工作电流的调整。

OCL 电路的特点是输出管静态的中点电压为 0V，如图中所示，

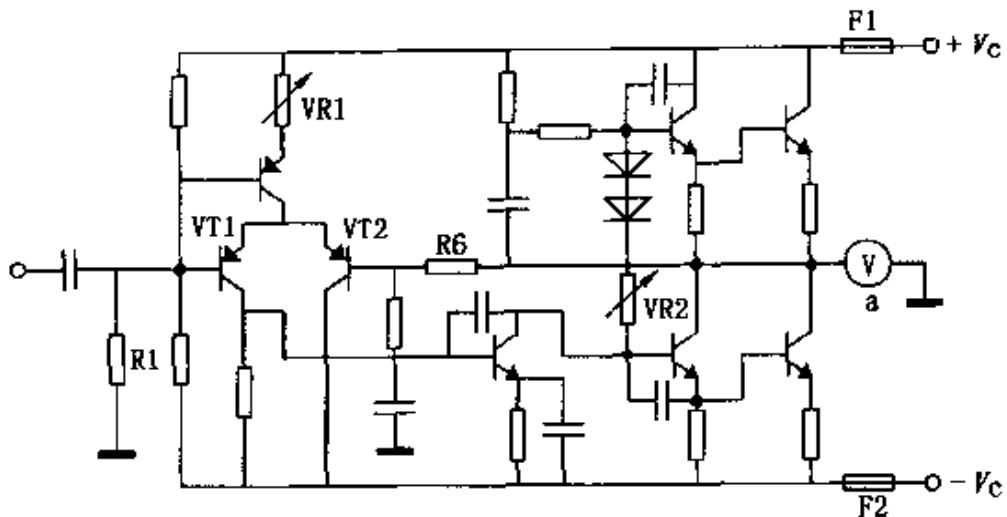


图 3.2 OCL 功率放大电路

将一多用表接入电路中 a 点上，并置于直流电压挡，调节电路中的可调电阻 VR1，使多用表的读数为 0V 即可。如果在调整过程中，其中点电压始终不能够调至 0V，一般为配对管 VT1 和 VT2 的参数不完全对称或电阻 R1 和 R6 阻值相互偏差较大所致，需要经过适当地更换、调整元件后再进行调整。

输出管的静态工作电流的调整方法与 OTL 的静态电流的调整方法是一样的。取下保险丝，接入一多用表，将其挡置于直流 mA 挡，调整电路中的可调电阻 VR2，使多用表的电流读数与所设计的数值相一致即可（根据不同的输出功率，其静态工作电流也有所不同，一般输出功率在 50W 以下，其静态电流为 20~50mA）。需要注意的是，调整输出管的静态工作电流时，应在调整好输出管的静态工作电压的情况下进行。

第二节 功率放大器的检测

功率放大器制作完成后，一般需要对功率放大器的性能指标进行检测，以确定所制作的功率放大器的技术指标是否达到预定的数

值。但检测功率放大器需要一些设备，如：音频电压表、失真度检测仪等。这里简要介绍一下检测方法，有条件的制作者可以对制作的功率放大器进行检测。

一、额定输出功率的检测

额定输出功率是指在放大器的谐波失真度为额定值（1%）时，在规定负载上所能得到的输出电压或功率有效值。具体的检测电路如图 3-3 所示， R_L 为 8Ω 的假负载电阻（应能承受规定的功率）。测量时，调整信号源（正弦波信号发生器或 CD 测试片的正弦波信号）的频率和输出幅度，给放大器输入 1000Hz 的正弦波。当失真仪指示达到 1% 时，读取音频电压表的电压指示值（有效值） U_0 ，并通过下式计算该放大器的额定输出功率。

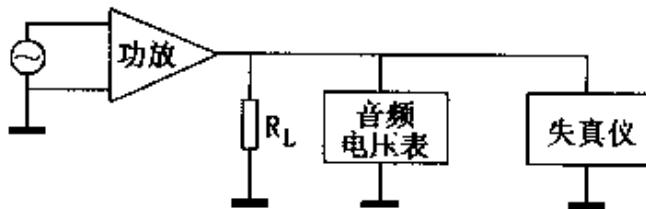


图 3-3 功率放大器额定输出功率的检测电路

$$P_{\text{rms}} = U_0^2 / R_L$$

若需要测量“最大不失真功率”，则可进一步增大信号发生器的输出幅度。当失真仪指示值达到 10% 时，根据这时音频电压表指示的 U_0 求得的功率即为最大不失真功率。

二、频率响应的检测

频率响应指放大器在额定输出电压或功率状态下的通频带宽度，它常用频响曲线来表示，测试电路与上图完全相同。测量时保持上面测得的额定输出电压不变，然后改变信号发生器的频率，使

之从 1Hz 开始按倍频关系逐点升高到 100kHz 上（无信号发生器时可用 CD 测试片的 20Hz~20kHz 信号）。把各个频率点的输出电压 U_0 记录下来，再以 1000Hz 时的 U_0 为基准，在对数计算纸上作出频响曲线。在曲线低端和高端输出电压（电平）下降 3dB 的两个频率点之间的频带即为放大器的通频带。这时“通带不平度”也可以从曲线上较直观地表现出来。

如果要定量计算通带不平度，可从记录下来的通频带内各频率点的电压值中找出变化量最大的频率点电压值（均指有效值） ΔU_0 ，再用下式计算。

$$\text{通带不平度} = 22 \lg [U / (U_0 - \Delta U)] (\text{dB})$$

三、信噪比的检测

信噪比 (S/N) 是放大器额定输出电压 (或额定输出功率时的输出电压) 与输出噪声电压的比值 (用对数表示)。检测时先测得额定输出电压 U_0 ，然后撤去信号源，在放大器输入端并接一只 $6k\Omega$ 电阻 (电阻装在接地的屏蔽盒里，代替信号源内阻)。此时，音频电压表指示的值即为输出噪声电压 U_N 。用下式计算，便可求出信噪比。

$$S/N = 20 \lg (U_0 / U_N) (\text{dB})$$

四、总谐波失真的检测

总谐波失真 (THD) 是输出信号波形中出现的二次、三次……谐波信号电压均方根值与输出信号总电压值的百分比。即

$$THD = (\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + \dots} / u_0) \times 100\%$$

总谐失真的检测电路与上图相同。检测时在放大器输入端输入 20Hz~20kHz 的正弦波信号，使输出电压达到额定输出电压值 U_0 ，再用失真仪测出 20Hz~20kHz 频率范围内输出波形的最大失真度 γ_1 (一般只测量 100Hz、1kHz、10kHz、20kHz 几个频点的失真度，

取其中之最大值), 然后撤下信号源, 测出信号源的失真度 γ_2 , 再用下式算出 THD 值。

$$THD = \sqrt{\gamma_1^2 - \gamma_2^2}$$

此时测出的是在额定输出电压或功率状态下的总谐波失真度。通常我们还需测量放大器在小信号工作状态下的失真度。这时, 可把输入信号电压降低 6dB 或 20dB 再进行测量。

五、互调失真的检测

互调失真的测量方法有好多种, 其中较常用的是测量互调失真信号均方根和的方法。测量时, 需将低频信号 f_1 和高频信号 f_2 混合输入放大器。 f_1 与 f_2 的幅度比取 4:1 或 1:1; f_1 一般选比放大器下限频率高一或二倍频程的频率, 如 40、60、80Hz 等, f_2 选比放大器通频带上限频率低一或二倍频程的频率, 如 50kHz、25kHz、10kHz 等。例如: 取 $f_1=40\text{Hz}$, $f_2=5\text{kHz}$ 的组合。用该法测得的互调失真表达式为

$$\text{互调失真 (IMD)} : \frac{\text{全频带内非线性信号的均方根和}}{f_2 \text{ 的振幅}} \times 100\%$$

式中的分子除了 f_1 、 f_2 自身的各次谐波外, 还包含这些谐波和基波之间各种组合的和拍与差拍, 如 $f_1 \pm f_2$ 、 $2f_1 \pm f_2$ 等。可见互调失真的测量比用单频作谐波失真的测量更能反映重放音乐时的失真状态。

互调失真的检测电路如图 3-4 所示。两信号源分别提供 40Hz 和 5kHz 的正弦波信号, 经混合后, 输入待测放大器, 使输出端两信号的振幅比为 4:1 (此时输入信号的振幅比不一定是 4:1)。将放大器的输出信号输入互调失真的检测装置, 调整输入衰减器, 使输入电平适当。

信号经 1.6kHz 高通滤波器滤除基频 f_1 后, 得到 f_2 信号, 此时由于放大器的非线性, f_2 信号上已带有调制包络, 这便是互调失真

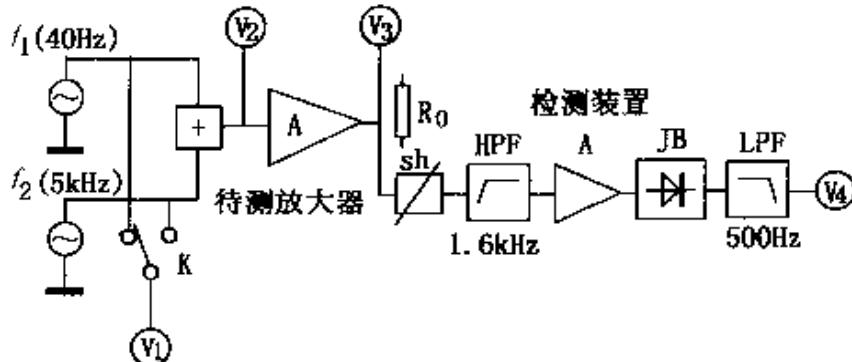


图 3-1 互调失真的检测电路

的产物，被调制的 f_2 信号经放大器 A 放大，线性检波器 JB 检波后，再经 500Hz 低通滤波器滤除残存的载波分量，便可检出互调失真分量。这时毫伏表 V4 的读数即为互调失真均方根和的数值，将该值和大的幅度值代入上式便可计算出互调失真的值。

由于两信号混合时，放大器输出信号的峰值是两者峰值的叠加，所以，在测量时应使放大器工作于等效正弦功率状态，即应使放大器的输出功率设定为额定输出功率的 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 倍。测量输出电压，则应为额定输出电压的 0.824 倍。

六、转换速率的检测

转换速率 (S_R) 指放大器在额定输出功率条件下，输入端加一阶跃信号（一般为方波信号）时，输出电压随时间变化的最大变化率。其检测电路如图 3-5 所示。

测量时，在放大器输入端输入 20kHz 的方波信号，调整方波信号幅度 V_P 使放大器达到额定输出功率状态，输出电压为额定值 U_0 （有效值）。用双踪示波器同时观察输入、输出电压波形，测出输出波形从 $10\%V_P$ （峰值电压）上升到 $90\%V_P$ 的时间 Δt_1 和输入信号波形固有的上升时间 Δt_2 ，再用下式计算转换速率

$$S_R = V_P / \Delta t = 2U_0 / \sqrt{\Delta t_1^2 - \Delta t_2^2} \quad (\text{V}/\mu\text{s})$$

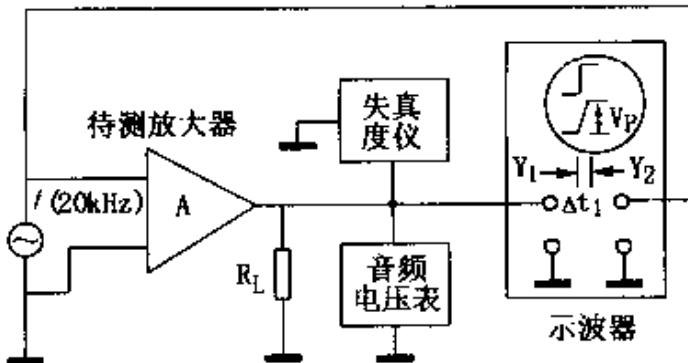


图 3-5 功率放大器转换速率的检测电路

七、输入阻抗的检测

输入阻抗 R_i 为放大器输入端的等效阻抗，检测电路如图 3-6 所示。测量时先给信号源串联一只 $1\text{M}\Omega$ 电阻，使之变成高内阻信号源，用音频电压表测得其空载电压 U_1 （所用电压表内阻应足够高，最好采用数字表，否则误差大），然后闭合 K 将该信号源接入放大器输入端。这时，毫伏表读数降至 U_2 ，再用下式进行计算即可。

$$R_i = [U_2 / (U_1 - U_2)] \times 1\text{M}\Omega$$

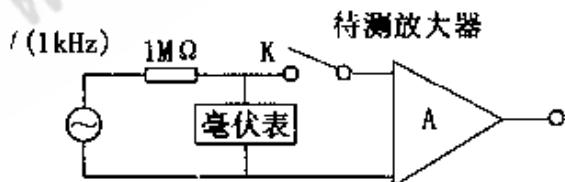


图 3-6 功率放大器输入阻抗的检测电路

八、输出阻抗及阻尼系数的检测

输出阻抗（也称输出电阻或输出内阻）指放大器输出端的等效阻抗，即从输出端向放大器看进去的阻抗。其测试电路如图 3-7 所示。通过开关 K 在放大器输出端接入 8Ω 的假负载 R_L ，输入 1kHz 信

号，使放大器达到额定输出功率状态，测得此时的输出电压 U_1 。再打开 K，撤掉负载电阻 R_L 。测量放大器的空载输出电压 U_2 （对电子管功放进行此项测量时动作要快，以防空载时输出变压器因初级电压过高而击穿短路），即可用下式计算输出阻抗。

$$R_o = (U_2/U_1 - 1) R_L$$

然后再用下式计算出功率放大器的阻尼系数 DF，即：

$$DF = R_L/R_o$$

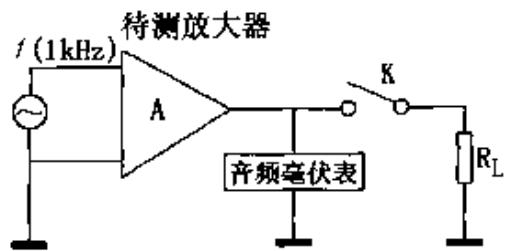


图 3-7 功率放大器输出阻抗及阻尼系数的检测电路

第三节 功率放大器的故障检查与排除

音响发烧友自己动手制作的功率放大器，由于技术、所选元件、装配工艺等原因，很容易出现一些故障，轻则功率放大器不能正常工作，重则烧坏功率放大管等器件，下面就自己制作的功率放大器常见故障的检查与排除作一介绍。

一、完全无声

完全无声即扬声器中没有任何声音，它与声音小的故障是有区别的，其故障部位一般在电源电路、放大电路和保护电路，常见的原因有以下几种：

(一) 无工作电压

直流电源无输出、电源保险丝熔断均会造成无电压，这可用万用电表检查。如果交流有输入，但直流无输出，应检查整流部分的元件和接线有无断路。如果是保险丝熔断，则要先找出熔断的原因。当有短路情况（例如大功率晶体管击穿）时，应把短路故障排除后，才能再次通电。

常见的短路原因有：功放级晶体管或滤波电容器因耐压不够而击穿、印刷电路板碰线等。

大功率晶体管与接地散热片之间常垫有云母片或聚酯薄膜作绝缘物，它们常会因安装位置偏移、大功率管或散热片的表面有毛刺而使绝缘击穿导通。因此，我们在安装前最好先检查其绝缘性能。另外，在焊接大功率管的引出脚时，也要注意别让焊锡流到散热片与引出脚之间。

在印刷电路板中，晶体管（特别是集成电路）各引出脚之间的距离较短，如果电路板蚀制不好或晶体管及集成电路的引脚焊接时不注意，就会造成短路。另外，蚀制印刷电路板之前，把手上油污沾在铜箔面图上，也常会使电路板留下细微的手纹，引起短路。还要注意的是电路板边缘的轮廓线，把它绘在印刷电路板的铜箔面上，也会出现短路情况，这些焊接前必须检查。

（二）电路中断或短路

例如扬声器及其接线断线或碰线、插头座接触不良、输入信号线断裂或短路、晶体管及其他电路元件损坏都会使扬声器无声。如果是扬声器及放大器输出部分的故障，扬声器将会出现无声现象。如果是前级故障，则扬声器仍会发出轻微的噪声，此时转动音量、音调电位器，该噪声的大小会随之改变，反之则有可能故障部位在音量电位器以后的电路中。

如果晶体管的直流工作状态正常，但是无声，则故障多由耦合电容器或旁路电容器开路所引起。

（三）自激

如果功率放大器出现很强的超音频振荡，就会把有用信号掩盖起来。因人耳听不到超音频，所以也好像是“无声”。此时用万用表交流电压挡可测量到功率放大器的输出电压，有示波器时还可观察到输出波形，大功率管发热严重。该故障的排除办法是消除高频自激。

二、元器件发热

当自制功率放大器的电路元件焊接错误、元件选择不符合要求、电路自激、装配与调整不当时，均会使功率放大器内部的元件发热甚至烧毁。一般来说主要有以下几种情况。

(一) 电阻发热冒烟

原因一：电阻器的功率不够。电阻器的功率大小由流过该电阻的电流（或加在该电阻两端的电压）所决定。在现代功率放大器中，没有标明电阻器功率数值的电阻，一般均为八分之一瓦，有特殊功率要求的电阻均标明其功率的大小。但在一些自己设计的功率放大器中，往往会忽视在不同电路中不同功率的电阻的需要。例如：图 3-8 所示电路由于接有自举电容器 C11，对于交流信号来说，R14 等于并接在功率放大器的输出端，所以在考虑 R14 的功率时，决不能只考虑直流电流所形成的功率，还要加上功率放大器在输出最大功率时，R14 所消耗的交流信号功率，因而 R14 的功率要用到 1 瓦以上。另一个电阻 R15，因 VT3 的集电极电流较大 (40mA)，所以 R15 的允许耗散功率要有 0.5~1 瓦。

原因二：因元件损坏而出现大电流。最常见的是输出级大功率管击穿，此时若功率放大器直流电源接有保险丝，保险丝将立即熔断。如果没有保险丝，已被击穿的晶体管的发射极电阻（图 3-8 的电阻 R17、R18）因通过大电流，就会很快发烫，时间一长便烧毁。

原因三：因放大器自激而产生大电流。如果功率放大器出现高频自激，会使功率输出级产生大电流。仍以图 3-8 为例，此时电阻 R17、R18 将发热（但不致烧毁），并且还因自激振荡的频率高、幅度大，R19 通过 C18 的耦合，成为功率放大器的负载，放大器输出的振荡电流使 R19 发烫。

为了便于判断是否存在高频自激，初学者试装时可先用四分之一瓦的电阻来代替 R19。此时如果出现自激，R19 就有焦味发出，从

而让调试者警觉，立即关掉电源。待故障排除后再把 R19 换成 2~3 瓦的电阻。

强烈的高频自激，有时会把输出级晶体管（特别是集成电路）击穿。此时最好先把消振电容的容量加大，并暂时降低电源电压，才可更换新的器件，再次通电调试。

原因四：晶体管连接错误而产生大电流。业余品晶体管有的没有标记。业余爱好者在利用这些晶体管来装配功率放大器时，常会出现搞错晶体管极性的情况。如果把功率输出级 PNP、NPN 型晶体管的极性搞反，就会在一开启电源的瞬间把大功率管击穿，从而产生大电流。若击穿的晶体管是塑料封装的，则会随之爆裂。

另外，整流管或滤波电容器的极性接反，也会被击穿，使扩音机出现大电流。我们在通电调试功率放大器之前，一定要检查它们的极性。

（二）散热器发烫

正在使用中的功率放大器，输出级晶体管的散热器发烫是正常现象。但如果温度很高，烫到连手也不能触摸的程度，就是不正常了。散热器发烫说明输出级晶体管的集电极耗散功率明显增大，其产生原因有以下几方面。

原因一：功率输出级静态电流过大。普通功率放大器的输出级晶体管多工作在接近乙类的状态，静态电流只有几十毫安。如果静态电流显著增大（例如达几百毫安），晶体管的静态功耗便大得多，

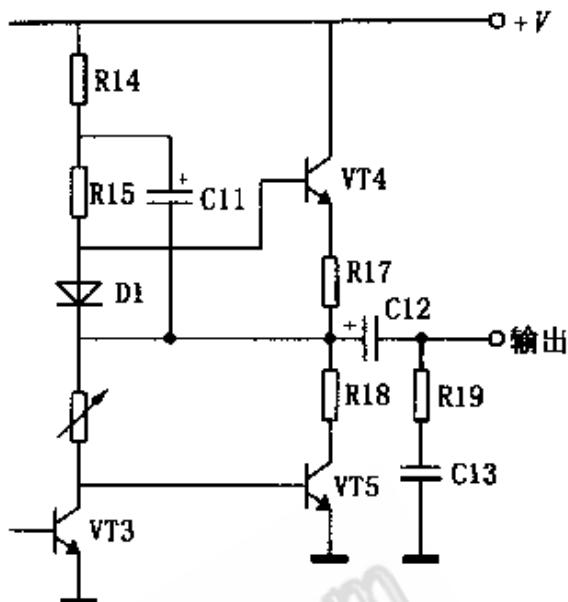


图 3-8 电阻器发热原因示例电路

原设计的散热器无法承受，会达到发烫的地步，时间一长，大功率晶体管便会引起热崩溃，直到烧毁。

对于单端输出的互补推挽式功放电路而言，输出级晶体管的静态电流由偏置电路所决定。这些电路如果出现开路（或阻值明显变大）情况，输出级晶体管所得偏压就会比正常值高得多，输出级出现大得多的静态电流。这其中晶体管开路的情况最常见，应首先检查。

这里还有一个偏置电路的可变电阻在通电前应调到哪里的问题。总的原则是应调在偏压绝对值最小的位置。但因偏置电路不同或因可变电阻在电路中的位置不同，该电阻在通电前应调到的起始值有所不同，如果起始值与图不符，在做静态调整之前，输出级晶体管会出现大的静态电流，使散热器发烫。

由于硅晶体管的输入特性曲线很陡直，所以在调整偏置电路的可变电阻时，一定要小心地缓慢调整，以防电流迅速增大。如果手头上的万用电表有低电压挡位，则在检测输出级晶体管的集电极电流时，测量该晶体管发射极电阻上的压降就行。

原因二：温度补偿不足。电路中二极管、热敏电阻、三极管等都是补偿元件，利用其电压降能随环境温度的升高而降低这特性，来对输出级晶体管的静态电流加以补偿。如果补偿不足，环境温度升高后，大功率管的静态电流便明显增大，晶体管就发热，发热结果又使电流进一步增大，如此恶性循环，将导致散热器发烫，直到放大器失去工作能力或烧毁输出级晶体管。当输出管采用锗管时，此情况较易发生。

发热的大功率晶体管的管壳要垫上云母片、聚酯薄膜等绝缘垫片，垫片两面最好涂上导热的硅脂。

原因三：输出级晶体管处于临界击穿状态。在选择晶体管时所用的 B_{Uce} 等参数是在基极电流等于零时测得的，此时集电极电流十分微弱。如果扩音机负载为纯电阻，输出级晶体管集电极与发射

极之间的最高反压只出现在晶体管截止时，所以选用的晶体管只要能满足设计条件中所列的反压要求，一般是可以正常使用的。但有的晶体管反向特性不佳，只要有少量的基极电流注入，反向击穿电压便明显下降。这样的晶体管在作大信号放大时，便很容易出现临界击穿。此时晶体管的功率损耗加大，散热器发烫，从扬声器里可听到夹杂在信号中间的噪声。由于这种击穿只在大音量时瞬间发生，所以晶体管还不至于马上就损坏。但如此连续使用下去，晶体管继续发热，反向特性会更加变劣，最终会导致击穿损坏。

考虑到实际扬声器的阻抗并非纯电阻，并且有的电路（例如新甲类放大电路）里的输出级晶体管在集一射间反向电压最高时仍不会进入截止状态，我们选管时必须把反向击穿特性不好的晶体管剔除。

原因四：功率放大器有高频自激。功率放大器如果有自激，将引起输出管的集电极电流增大，其散热器也随之发热。那么，怎样区分散热器发热的原因呢？用手摸一下阻抗补偿电阻。如果该电阻发烫，发热原因就是高频自激。如果该电阻正常，就是最大功率管出现大的静态电流所致。

原因五：散热条件不良。这是装配工艺方面的问题，例如散热器被不透风的物品所包围，机壳没开通风孔等。只要设法让散热器的热量辐射出去，并加强空气流通便可解决。

三、输出中点直流电位失常

对 OTL、OCL 等形式的单端推挽电路来说，其输出中点的直流电位，需有一个正常值。单电源供电时，该值约为电源电压的一半，双电源对称供电的，该值便是零。稍微偏离正常值一点是正常的。如果偏得很多，就说明电路工作失常，此时轻则使输出功率减小、重则使晶体管损坏，甚至烧毁扬声器。

(一) 中点直流电位失常的原因

原因一：电路工作点未调好，或晶体管使用一段时间后参数发生变化。碰到这类情况，通常可以重调放大器的工作点，使中点直流电位恢复正常即可。

原因二：电路元件损坏。最常见的是晶体管损坏，此时调整工作点将无效。检查方法是：先用万用电表检查各个晶体管的 PN 结是否完好？再通电检查各级的工作点是否正常？对于较复杂的 OCL 电路，由于各晶体管的工作点会互相牵连，检查时需对照电路原理进行分析，并根据输出中点直流失调电压的极性和大小找出故障发生的地方。

有的晶体管反向特性不好，加上工作电压大，反向电流很大，这也会使电路工作点严重失调，此时必须更换晶体管。

在激励级晶体管集电极与基极之间的消振电容器漏电，也会使输出中点电位失常。这种现象在采用小型瓷介电容器时较易发生（这类电容器耐压低），最好改用云母电容。

(二) 解决中点直流电位漂移的方法

对直接耦合的多级放大器来说，输出中点的直流电位漂移，说明了电路内部存在不稳定的因素。当然，少量的漂移是允许的，也是难免的。下面是产生漂移的主要原因。

原因一：因环境温度变化或器件工作一段时间后管心温度升高，使晶体管的反向电流 I_{CBO} 和基极—射极间电压 U_{be} 发生改变，导致输出中点电位漂移。整个直接耦合环节里第一级晶体管产生的漂移影响最大。

原因二：因电源电压变动而使输出中点直流电位漂移。这对于较简单的电路来说是难免的。在一些简单的 OCL 电路中，没有恒流措施，差动放大级是单边输出，这必然使电源电压的变化不对称地反映到输出级的两臂上，造成中点电位漂移。

为了解决漂移问题，可采取以下办法：

首先选用优质器件。特别是直耦功率放大器的第一级，更应选用优质器件。例如 OCL 电路的差动放大级，可选用专供直流放大器使用的孪生晶体管或孪生场效应管。即使是用单个的分立元件，也应加上实际的工作电压来测量它的反向电流，有条件时还可用数字式直流电压表测量其 U_{be} ，如能按实际工作条件，通电老化几小时后再测量选配，效果更好。

其次，利用热耦合等措施来补偿。作为差动放大的两个晶体管，如果温度变化相同，漂移将得到补偿。可将两只塑封管的接触面涂以硅脂，然后用绝缘胶纸把它们包扎在一起。若是用金封管时，可拿铜或铝做一个均温块，按晶体管的外径大小钻两个孔，把需要均温的两个晶体管涂上硅脂，然后放进均温块的孔里，以实现热耦合。

四、放大器自激

放大器出现自激振荡，是自制功率放大器最常见的故障。自激的形式大致有两种：一是接通电源后马上出现连续自激，这多是所用元件不当或布线、焊接上的错误所引起；二是有信号输入时才自激，并且其振荡大小与波形会随音量、音调等控制旋钮的调节位置以及负载扬声器的接入情况而变化。后一种自激往往涉及电路内的多种因素，需要花费较多时间才能查出产生的原因。

（一）自激的故障现象

现象一：散热器和一些电阻发烫。这些现象在上面已介绍过。但前置放大器出现自激，经功率放大器放大后也会出现类似现象。此时可把功率放大器与前置放大器之间的接线断开，如果上述现象消除，就说明自激是前置放大器产生，或因前置与功率放大器之间连接不当而引起。

现象二：功放级静态电流无法调整。功放级自激使功率输出管产生大电流，即使自激振荡比较弱，功放级也不会工作于“静态”。此时调节有关偏置电阻，将出现“静态”电流无法调整的现象。

在调整功率输出级工作点的时候，有时还会出现一种怪现象：输出级静态电流较小（例如 10mA 以下）时调节正常，但再调上一点，电流便突然猛增。或者与此相反，开始时电流很大，调到某一点时电流突然减小。这些都是功放电路处于临界自激的迹象，只要工作条件有少许改变，自激便会马上发生，所以也要把它排除。

现象三：扬声器里出现振荡叫声。如果自激振荡的频率不在超音频，我们便可以从扬声器里听到振荡叫声，并可根据振荡频率的高低来判断自激产生的原因，如通过导线之间的感应或通过电源内阻的有害耦合等等。

现象四：音量较大时出现啸叫声。这是一种有条件的自激，即信号较大时才把自激诱发出来，信号幅度减小后，自激也随之消失。此故障多由接地不良或印刷电路板布线不当所引起。这类潜在故障往往被忽视，等到播放大音量的音乐试听时，轻微的自激还会被误认为是放大器的失真。

现象五：重放声音带有拖尾。放大器的频率特性不均匀，频响曲线在某段频率出现突出的尖峰，便会使节目信号在该频率附近激起一段减幅振荡（振铃现象），听起来像是节目信号的背后附有拖尾。

如果变压器的容量不够，电源内阻便增大。在开机时或强信号输出之后，会出现减幅振荡，听起来也好像声音带有拖尾。

实际直流电源的内阻决不会等于零，况且因滤波电解电容器的容量限制，以及电容器内（包括连接导线）感抗成分的存在，使低频和高频时的电源内阻更加升高。功率放大器的输出电流通过直流电源的内阻时，将产生相应的电压降。如果前、后级共用一电源，该电压降就将通过电源内阻耦合到前级，形成低频（俗称汽船声）或高频的自激振荡，有时还会出现高频调制于低频的间歇振荡。

（二）抑制自激的方法

（1）前、后级各用独立的电源供给。

（2）加强退耦措施。

- (3) 采用稳压电源。
- (4) 减短电源输出接往功放级的连接线。
- (5) 采用无感电解电容器作为滤波电容器。可在滤波电容器的两端，以及输出级集电极与地之间加接 $0.1 \sim 1\mu F$ 的涤纶薄膜电容器作高频通路，以降低高频时的电源内阻。

如果放大器的输入线（或元件）与输出线、电源线相邻太近，通过它们之间的寄生电容、寄生电感（互感）就会产生耦合，轻则使扩音机的高频特性不规则，重则形成高频自激振荡。要防止这类自激发生，装配功放机时要注意下列问题：

输入接线决不要靠近输出线和电源线，更不要捆扎在一起。如果前级输入线的长度超过 5cm，最好用金属屏蔽线。通过大电流的输出线、电源线要粗而短。绘制印刷电路板时也要注意上述原则，宁可加用跨接线也不要让印制导线绕大弯。检修功率放大器时，如果拨动放大器的输入、输出线，自激振荡的情况会跟着改变，便可判定是这一类自激。

（三）抑制放大器的高频自激

放大器自激往往与反馈有关。图 3-9 所示为加有级间负反馈的三级放大器，常见的功率放大器大都可归结成这种模式。由于受晶体管截止频率的限制，再加上电路结构与装配工艺上的其他原因，每一级都必然存在一个高频上限频率，并引起高频输出的相应滞后（上限频率的相位滞后 45° ）。显然，各级滞后叠加的结果在某个频率以上，输出信号的相位滞后将超过 180° ，反馈变成正反馈，此时如果放大器的增益仍大于 1，就会出现连续的高频自激振荡。因此，抑制高频自激的途径便是：设法降低放大器的高频增益；设法减小输出信号的相位滞后；设法拉开各放大级的高频上限频率间隔，以破坏高频自激的幅值条件和相位条件。常见的做法如下。

(1) 电容滞后补偿。在晶体管的集电极与基极之间接上一只小电容器 C_{bc} ，对高频起负反馈作用，达到降低该级高增益的目的。

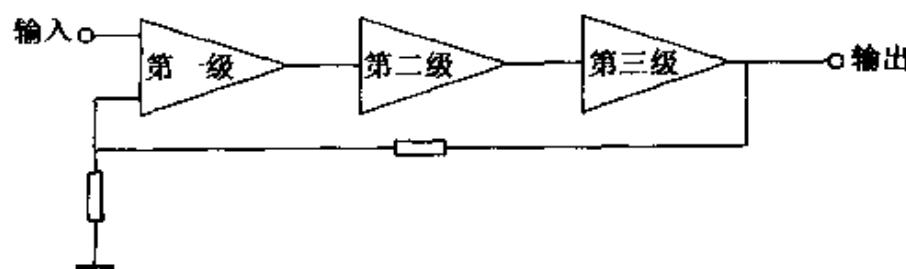


图 3-9 多级放大器的工作模式

般的 OTL 和 OCL 功率放大电路中，以第二级（激励级）的电压增益为最高，把 C_{bc} 加在该级对抑制高频自激较为有效，如图 3-10 所示。多级直接耦合前置放大器的消振电容，也加在第二级为多， C_{bc} 的容量不宜超过 100 微微法，通常只要 10~50pF 即可。

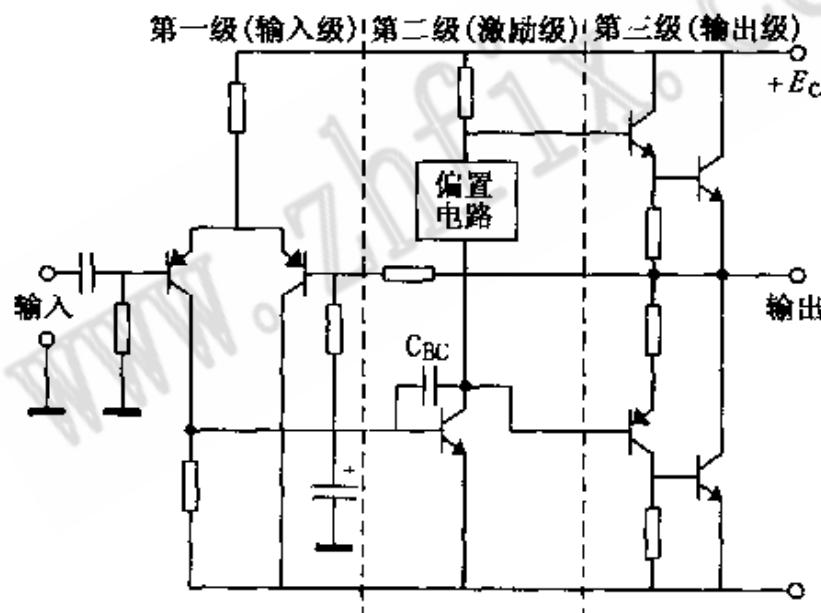


图 3-10 电容滞后补偿电路

C_{bc} 的加入，使第二级在高频时的增益明显降低，并把本来比较接近的第一、二级的截止频率拉开，达到较好的消振效果。 C_{bc} 的加入却会使整个放大器的高频输出的相位滞后，如果 C_{bc} 的容量较大，还会使放大器的高频响应变差，瞬态互调失真加大。因此在使放大

器不产生自激的前提下， C_{bc} 的容量越小越好。

(2) 电容超前补偿。如果在级间反馈电阻上并上一个小容量的电容器 C_f ，如图 3-11 所示，即可把输出端提取的高频反馈信号的相位提前，从而抑制高频自激。

(3) 负载阻抗补偿。为了保证功率放大器的安全运行，一般均在其输出端接上 RC 阻抗补偿网络，用以补偿扬声器的感抗成分，如图 3-12 所示。当负载扬声器的阻抗为 8Ω 时，补偿网络的 R 常取 10Ω ，C 取以 $0.047\sim0.15\mu F$ 。此时，补偿网络对 $1000kHz$ 以上的超高频才有衰减作用。由于该网络能抵偿扬声器的电感分量，使放大器的实际负载阻抗在高频时并无明显增高，再加上该网络对超高频的衰减作用，使得放大器在通频带以外的高频增益下降，所以从抑制高频自激的角度来考虑，该网络也是有效的。

为了使扬声器导线的分布电容不致带来高频不稳定因素，我们还可以在功率放大器的输出端上串接一个 RL 并联网络，如图 3-13 所示，用以防止容性负载对放大器的影响。

另外，还可采用改用频率特性好的晶体管、减小晶体管的电流放大系数等手段来达到抑制放大自

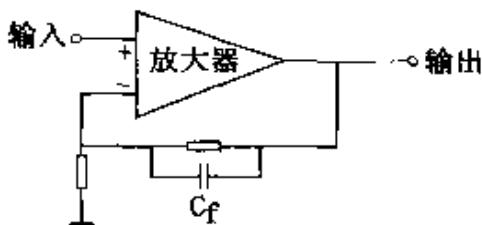


图 3-11 电容超前补偿电路

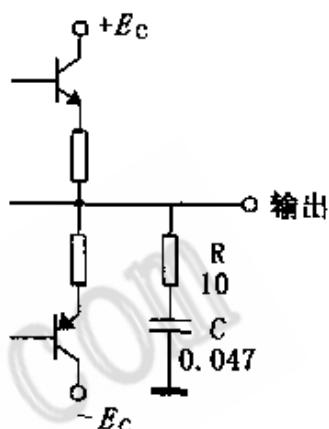


图 3-12 负载阻抗补偿电路

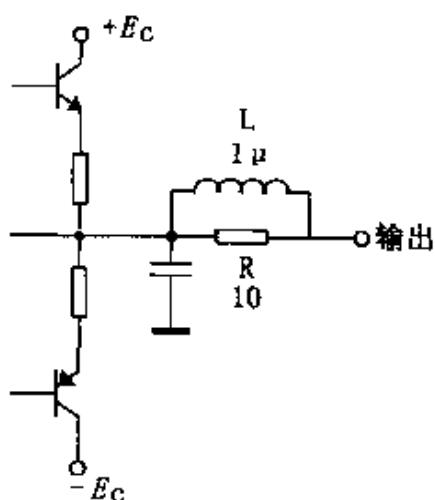


图 3-13 输出端负载 R_L 补偿电路

激的目的。

五、重放声音小

造成功率放大器重放声音小的原因主要有以下几点：

- (1) 信号源输出弱。
- (2) 放大器的增益不够。
- (3) 功率放大器输出功率偏小。
- (4) 扬声器效率低。

对于信号源及扬声器的故障，可用替换的办法迅速判断出来。另外，由于橡皮边扬声器的效率较低，它比普遍扬声器声小也是正常的。

功率放大器增益不够，还是最大输出功率不足，可以用加大输入的方法来判别。例如把收、录机的信号直接往功率机的传声器插口输入，如果音量够大，就说明功放机的输出功率足够，只是放大器的增益低。反之，如果加大输入后只会引起失真，音量并无显著增大，就是功率放大器的输出有问题了。

如果功率放大器的最大输出功率达不到设计要求，可按下述步骤检查。

首先检查大信号输出时的电源电压是否足够？如果不，输出功率必然不足，这时应从电源方面检查原因。另外，如果功率输出管的静态电流太大，就会增加电源的负担，使电源电压不足。

电源电压足够，但最大输出功率不足，则是功率放大电路的电源电压利用系数偏低，应检查与利用系数有关的元件，例如大功率输出时，输出管严重发热，且声音失真，便说明大功率管的 I_{CM} 偏低，管内压降大，应更换功率管。若没有这些现象，则多为激励级和输出级的发射极电阻太大所致。

当功率输出管采用截止频率较低的锗合金管时，常会出现高频信号的最大输出功率不足等情况，但这时低频输出是正常的，换用

截止频率较高的晶体管便可改善高频输出。

六、重放声失真

这里所说的声音失真是指功率放大器还未达到最大功率输出时就产生明显的失真。功率放大器的前置放大和功率放大部分出现故障，都有可能引起声音失真。

(一) 小信号时失真

小信号时失真严重，但大信号时失真不明显，这常是交越失真的反映。用示波器观察输出波形，可看到信号两半波之间不能平滑连接。对此，加大功率输出管的静态工作电流常可解决。

如果静态工作电流加大到 50mA 以上，小信号失真仍不能明显降低，便是功放管的小电流特性不良，应予更换。在功率输出管的功率余量较大和散热条件较好的情况下，也可采取继续加大功放管的静态电流来解决。

如果上述失真情况随信号频率变化而异：频率低时失真小，频率高时失真大，就是晶体管的开关失真，可更换开关特性较好的晶体管来解决。

(二) 大信号时失真

小信号时不失真，大信号时失真，又有以下几种情况：

输出信号失真时，输出中点直流电位基本正常。这多因功率输出管大电流特性不好、 I_{cm} 不足所引起，用示波器观察输出波形时会看到上、下波顶变圆。

输出信号失真时，输出中点直流电位偏高或偏低（无信号时是正常的）。这说明输出波形不对称，是功率输出级两臂不对称或激励不平衡引起。如果输出中点直流电位偏高，表示上臂比下臂放大倍数大或激励信号幅度大；反之，输出中点直流电位偏低，则表示上臂比下臂放大倍数小或激励信号幅度小。用示波器观察波形可看到上、下半波幅度的差异。如果是准互补对称输出电路，把上、下臂

的功率输出管掉换位置使用，不对称的情况也倒转过来，便可确定是输出晶体管不对称所致。否则，若不对称情况没有变化，则多为激励不平衡所引起，调整平衡电阻就能解决。即使是输出大功率管不对称，也往往可用调整平衡电阻的方法来改变推挽两臂输入信号的大小，使两臂输出对称。

如果调整平衡电阻无效，则失真来自激励信号。常见原因是激励级工作电流过小，可采用调整激励级的工作点来消除。

如果晶体管的高频特性不好，或功放集成电路的补偿欠妥，就常会使高频输出信号产生某种对称失真。这时只有更换频率特性较好的晶体管，调整补偿电容才可解决。这种失真不会使输出中点的直流电位发生偏移。

七、重放噪声大

对于交流噪声大的故障，可首先检查一下电源的滤波电容是否存在故障。若是集成电路功率放大器，可用电压检查法检查一下功率放大器的输出端的直流工作电压是否正常，以确定是否为功率放大集成电路的内部电路原因而产生噪声。

如果交流噪声不是太大，可用一只 $2200\mu\text{F}$ 的电容（注意其耐压值）并接于电源滤波电容的两端进行试机。

如果某一个声道有重放噪声，可检查一下功能转换开关是否接触不良。

对于在调节转动音量电位器而出现噪声，可用无水酒精清洗音量电位器，或更换一只新的音量电位器。

由于电子管功率放大器的电路结构及制作工艺与晶体管功率放大器有着较大的区别，因此故障检查的方法也有所不同，一般来说，电子管功率放大器主要有以下几种故障现象。

1. 输出功率变小，声音很小

原因一：功率管老化（新装机不存在此问题，但使用旧的电子

管，也有可能存在此问题）。可测量功率管的屏流来判别。用 100mA 的直流电表，负表笔接屏极，正表笔接输出变压器，开启高压就能从电表中读出屏流数。在偏压正常情况下，如果测得屏流小于正常值，就可以说明功率管衰老。如果测得的屏流大于正常值，则可能有几种情况：①功率管屏压过高，特别是帘栅极电压过高；②功率管本身质量有问题，本身屏耗大，输出功率势必减少。如果测不到屏流，就说明功率管已经损坏。

原因二：栅偏压不正常。在自给栅偏压的功放电路中，常见栅偏压的故障有：①无偏压，造成这种情况的原因有功率管失效无屏流、阴极电阻两端无电压降，阴极旁路电容器被击穿等。②偏压小，原因为功率管衰老或屏压低。③偏压高，原因为屏压增高（特别是帘栅压增高使屏流增大）、阴极电阻阻值增大、栅极交连电容器漏电或击穿使栅极上加有正电压等。此外，阴极电阻开路也会使偏压增大，此时屏流很小，线路存在寄生振荡。

原因三：输出变压器局部短路。它将造成屏流增大，从而使屏极发红，输出减少且失真增大。如果是初级局部短路，那么在空载时输出电压不会减少，在接上负载或负载很轻的情况下，只要栅极激励电压达到额定值，功率管全部屏极就发红，这是个典型现象。检查输出变压器初级是否局部短路，可将输出变压器初次级接线与电路全部断开，从初级端上送进 220V 市电，用万用电表交流挡测量两个初级端与 B+ 中心头的电压，正常时，两线端电压相等，有局部短路时，则一线端电压低于另一线端电压。如果一接上 220V 市电就立刻烧毁保险丝，就说明局部短路很严重，必须更换输出变压器。

检查输出变压器次级有无短路故障前，首先要检查次级上并联的高频抑制电路和负反馈电路元件有无变质、失效和击穿等情况，然后再检查次级线与铁心之间有无击穿短路。

原因四：推动级激励电压（或功率）不足。功率管栅极激励电压（或功率）不够，无论功率管工作状态怎样正常，仍不能有额定

的功率输出。

原因五：多管并联推挽工作，其中一只或数只管的屏极抑制电阻或栅极抑制电阻开路。此时不仅失真大，而且输出功率小。

原因六：自给栅偏压的阴极旁路电容器失效形成开路，产生电流负反馈。对某些胆机来说，这可能影响输出功率。

2. 功率放大级高压加不上

高压加不上有两种情况：一是通电时，保险丝立即烧断，二是胆机在工作过程中突然烧断保险丝而切断高压电源。将放大器的输出变压器中心头高压 B+ 与高压电源连线断开，然后开启高压，如果此时仍然烧断保险丝或不能启动高压，故障就不在功率放大电路，而在电源电路；若断开高压 B+ 连线后，能启动高压，则可以肯定故障在功率放大级。

原因一：观察或测试功率管内部是否各电极相连。

原因二：检测输出变压器是否击穿短路。常见是初级或次级线圈间被击穿短路。

原因三：负载过重或负载短路。负载过重或短路会导致使屏流增大而过载，烧断保险丝或加不上高压。

3. 寄生振荡

放大器出现如“嘶啦嘶啦”的高频振荡和“噗噗”的低频振荡等寄生振荡声时，轻则屏耗增大，屏极发红，输出减少，重则不能工作。产生寄生振荡的原因有以下几种：

原因一：负反馈电阻等元件变质或损坏。

原因二：输出变压器次级并联的旁路电容器开路或击穿。

原因三：多管并联推挽工作的屏、栅极电阻损坏或变质。置换栅极电阻，千万不可用线绕电阻，因为它的电感将引起振荡。

原因四：功率管尤其是高互导式功率管及抑制振荡电路中的元件使用日久后参数变化。

原因五：电源电压过高。供电电压过高会破坏功率管正常工作

状态而引起振荡。

4. 功率管屏极发红

放大器正常工作时，如果在较明亮的环境中看到屏极发红，就是不正常的现象。引起屏极发红的原因可能是：

原因一：负载过重引起屏流过大。这种现象比较常见，主要是由于扬声器阻抗配接不当、外线有短路或输出变压器初级线圈局部短路。

原因二：负栅偏压减少，或无负栅偏压，或出现正栅偏压。

负栅偏压减少的原因可能是：负偏压电源滤波电容器失效或容量减少；分压负载电位器中心滑片调得过低；整流管衰老；偏压电源变压器次级局部短路；自给栅偏压的阴极旁路电容器漏电严重；输入变压器的初级和次级（或耦合电容器）轻微漏电等。

无负栅偏压的原因可能是：输入变压器中心抽头断路；偏压电源滤波电容器短路；偏压负载电阻损坏。整流管或偏压电源变压器损坏；自给负栅偏压阴极旁路电容击穿；栅极电阻或输入变压器次级断路；管座损坏，使栅极管脚与管座脱离。

原因三：后级功率管的屏压或帘栅压升高，使屏流增加，屏极发红。

屏压升高的原因可能是：高压电源变压器初级线圈局部短路，使次级高压线圈的交流电压升高；整流后输出直流电压增加；泄放电阻断路，输出电压升高；滤波扼流线圈局部短路，电感量减少，降压减少，输出电压升高。

帘栅电压升高（指采用束射四极管和五极管做功率放大级的机器），吸收电子的能力增强，使屏流增加，屏极发红。原因可能是：高压电源变压器初级局部短路，使次级高压升高，整流输出直流电压增加；次级高压电位器调整不当；次级高压滤波扼流圈匝间局部短路，使输出电压升高；泄放电阻断路，输出电压升高。

原因四：超高频或高频寄生振荡，致使屏极发红。这两种寄生

振动荡是由于后级的总寄生电容的正反馈引起的。有效的判断方法是，当屏极发红时，将负载阻抗换成放大器输出功率 $1/20$ 左右的电阻，阻值等于输出阻抗。开机不送入信号，几分钟后，手摸电阻如果感到发热，就存在高频寄生振荡了。

原因五：推挽管衰老，破坏推挽平衡，引起屏极发红。在推挽功放中，尤其是在并联推挽中，其中一边的管子衰老，内阻增加，屏流减少，没有衰老的管子负担过重，屏流增加，屏极发红。

原因六：输出变压器的初级线圈的一边局部短路，破坏了推挽平衡，使该边的屏流增加，屏极发红。

原因七：输入信号过大，使输出电流和电压超过额定值，引起屏极发红。

原因八：有些放大器本身设计不当。因屏压、帘栅压、灯丝电压过高，或负栅偏压太小，静态屏流过大，甚至静态，也会使屏极发红。

5. 失真

失真是指经放大器输出的波形与输入的波形相差过大，使放大器放大出来的声音与原来输入的声音不一样，主要几种原因分析如下：

原因一：推挽功率管或推动级推挽管有一只衰老（或损坏），使两管的增益不一样，或者输出变压器初级（或输入变压器次级）一边局部短路或开路；屏极和栅极的防振电阻变值，也会破坏推挽平衡，引起失真。

原因二：有的放大器推动级与前级是用阻容耦合的，当一边的耦合电容器变值（容量变小、失效、漏电等）时就会产生失真。如果该电容漏电，还会使下一级电子管的负栅偏压变小，甚至变成正电压，产生栅流，引起失真。

原因三：固定负栅偏压过高或过低，使电子管的工作点发生变化，或输入信号过大等，都能使电子管工作于非线性部分，引起失真。

原因四：小功率放大器功率管一般都工作于A类推挽放大，如果输入信号电压峰值大于负栅偏压时，功率管将出现栅流，由于这类工作状态的栅路内阻较大，因此容易引起失真。

原因五：在中功率以上的放大器中，功率管一般都工作于B类推挽放大，如果推动级的输出功率不足或由于推动管衰老使内阻太大就会引起失真。推动级要用内阻小的电子管，并用降压变压器进行倒相，才能获得稳定的输出电压。

原因六：屏极负载电阻、阴极电阻或帘栅极电阻变值，使电子管的工作点变化，工作于非线性区，引起失真。栅极电阻断路，引起阻塞失真。同时负载阻抗太轻或太重，使电子管的输出阻抗不匹配引起失真或音轻等。

原因七：电源电压不稳定或过高过低，都会改变各级电子管的工作点，引起失真。

6. 交流声

一般来讲，后级电压放大倍数不大，因此，由功率放大级故障引起的交流声不十分明显，但有几种故障却能出现明显交流声。

原因一：功率管内部栅阴两极短路或漏电，阴极与灯丝两极短路，灯丝电源变压器接地不良。

原因二：固定偏压滤波不良。

原因三：推动变压器初次级间漏电，或栅极交连电容器漏电使栅极带正电等。

原因四：整机接地不良。特别是搭棚焊接和灯丝用交流电供电的胆机，对接地要求很高，在调试过程中要不断试用各个接地点，以获得最佳信噪比，另外接地点的电阻越小越好。

第四章 功率放大器制作实例

一、 $2 \times 75W$ TMOS150 功率放大器

(一) 电路特点

图 4-1 为 $2 \times 75W$ TMOS150 功率放大器的整机电路原理图。该电路十分简洁、实用，前置放大器选用低噪声、高转换速率的四运算集成电路 LM324(或 TL084)；前置放大器与功率放大器之间采用衰减—负反馈式音调控制电路；功率放大集成电路采用功率放大模块 TMOS150。

TMOS150 的内部电路由场效应管等构成。由于场效应管具备电子管放大器的特性，因此它的动态范围大，能承受高电压和大电流，而且转移特性在大电流下呈线性状态。选用 TMOS150 组成的末级功率放大电路，只要工作点选择合适，其不失真输出功率可达几百瓦。

图 4-2 为 TMOS150 的内部电路及外形尺寸图，表 4-1 为其性能指标。

本机输入阻抗较高，要求从前置放大电路输入的信号的激励功率也就较小，从而简化了前置推动级电路及偏置电路。

本机重放高音清晰，中音丰满，低音浑厚，层次感较好，且制作简单，成本低廉，较适合音响爱好者刚刚开始学习功放 DIY 时制作的入门功放机。

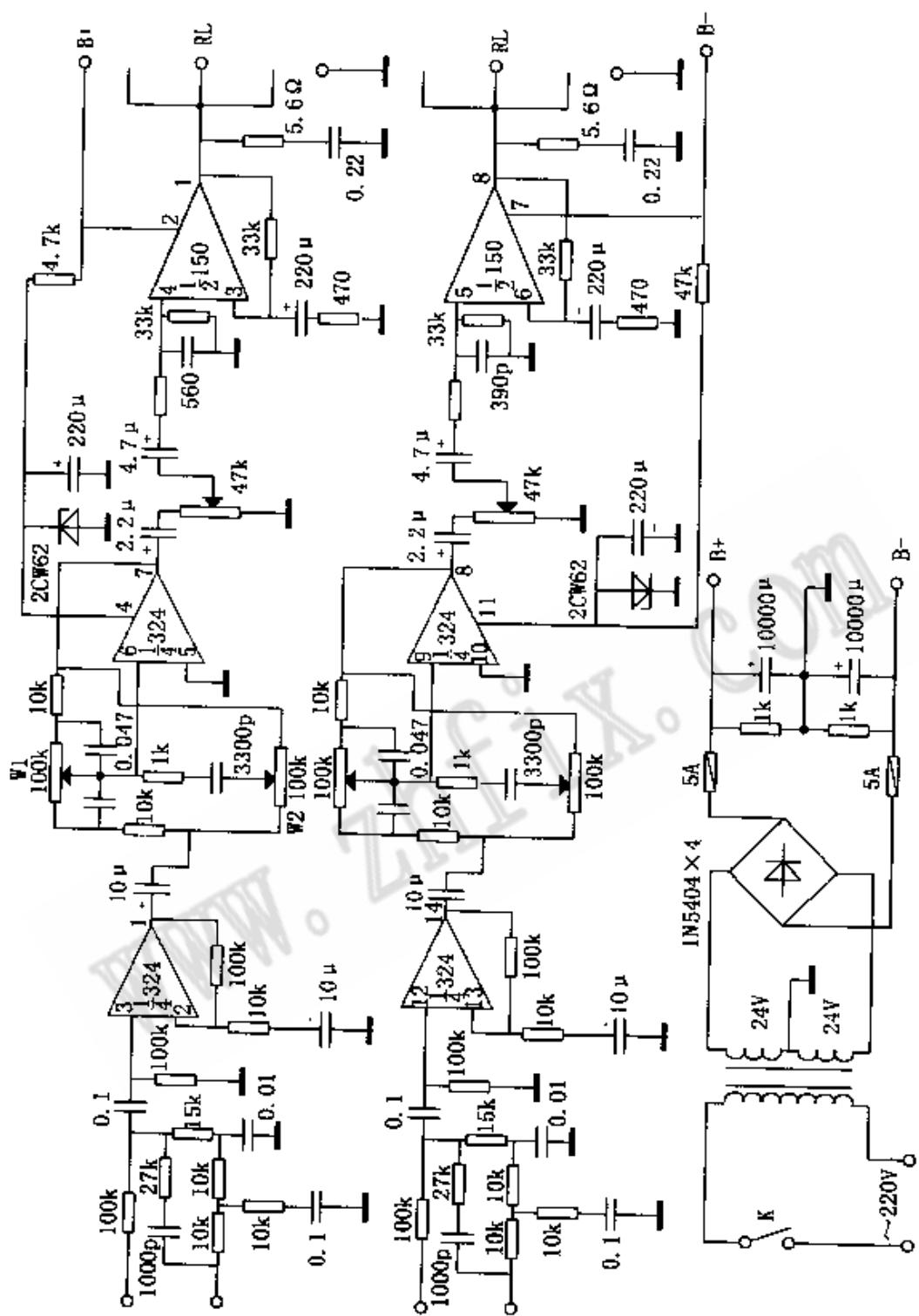
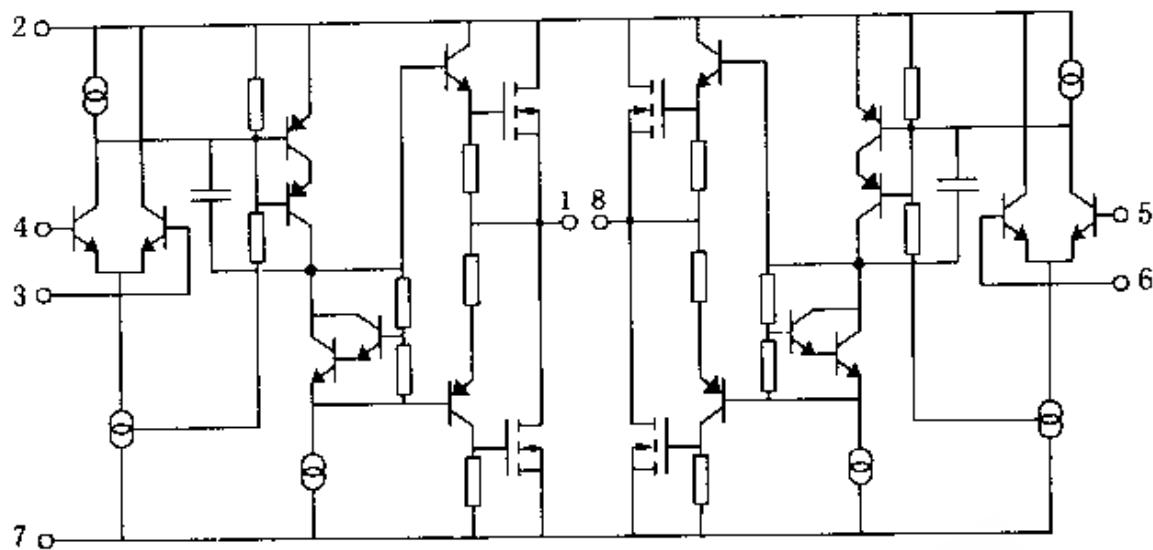
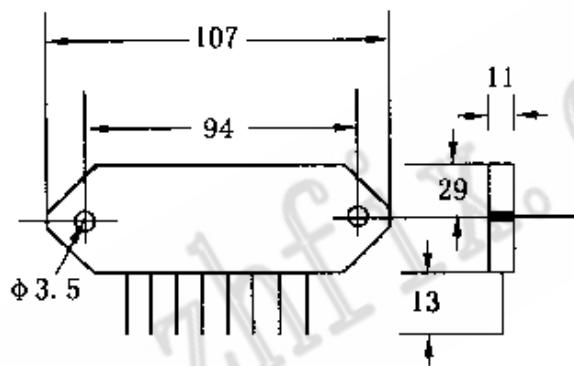


图 4—1 2×75W TMOS150 功率放大器的整机电路图



(a) 内部电路图



(b) 外形尺寸图

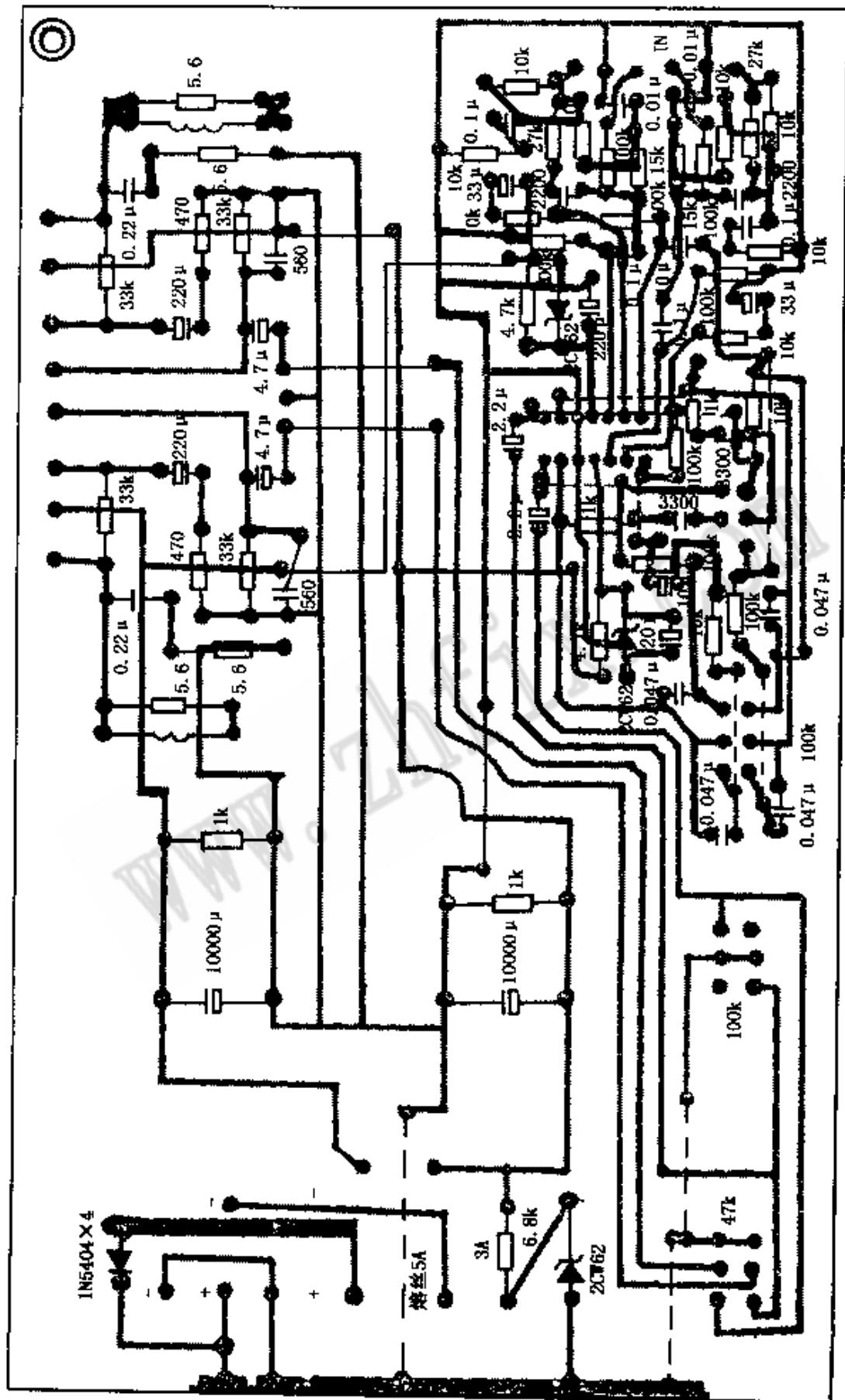
图 4-2 TMOS150 内部电路及外形尺寸图

表 4-1 TMOS150 的性能指标

参数	指标	参数	指标
电源电压	±35V	闭环增益	0.05%
频率响应	10~150Hz	输入阻抗	33kΩ
最大输出功率	2×75W	输出阻抗	8Ω
静态电流	≤100mA	允许温升	75℃
失真度	±50mV		

(二) 制作指导

图 4-3 所示为本机印刷电路图。只要元件安装正确,一般无需调试。电路中直流供电电压选用±35V。如果市场上无此相配套的电源



[图 1-3 2×75W TMOS 功率放大器印刷电路]

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。

变压器出售，就需自行制作，可采用进口冷轧硅钢片，铁心的截面为 $22\text{mm} \times 35\text{mm}$ ，初级采用 $\phi 0.31\text{mm}$ 的高强度漆包线绕1080圈，次级采用 $\phi 1.20\text{mm}$ 的高强度漆包线绕成两组110圈，交流输出电压为 $24\text{V} + 24\text{V}$ 。整流管可选用6A、100V正向压降较小的进口二极管。供电电源的滤波电容的耐压要大于50V，且容量需充足。输出电感可在 $\phi 8\text{mm}$ 的骨架上，用 $\phi 0.8\text{mm}$ 高强度漆包线绕20圈。

为了保证重放声的质量，音调和前置放大电路之间的耦合电容应采用无极性聚苯乙烯电容，电解电容应采用铌电解或钽电解电容。音调电路中的电阻及电容均应采用金属膜电阻及聚乙烯电容。音调电位器可采用 $100\text{k}\Omega$ 的X型同轴同步双联电位器，最好经过配对选用。电源的退耦电阻可选用 $4.7\text{k}\Omega$ 的1W电阻。音量电位器选用 $47\text{k}\Omega$ 的Z型同轴同步电位器。

(三) 注意问题

由于TMOS150功率放大电路的频率响应较宽，在制作过程中需要注意防止电路高频自激。TMOS电路的散热板与前级电路已隔离，故在安装时无需加装绝缘垫片，但必须保证它与散热器的接触良好，最好在散热器与TMOS150之间涂上一层硅脂，以利散热。散热器的尺寸应大于 $400\text{mm} \times 150\text{mm} \times 3\text{mm}$ 。如果电路经常在满载的状态下工作，就得考虑适当加大散热器的尺寸，一般把握散热器的表面工作温度以不超过TMOS150的允许温升为宜。

二、“傻瓜185”功率放大模块

(一) 电路特点

将功率放大电路模块化，给一些刚学功率放大器制作的音响爱好者提供了较大的方便。“傻瓜185”功率放大模块即为一十分简洁的功率放大模块，它在对输入的信号进行功率放大的同时，还具有过压、过热、过流等多重保护电路。

“傻瓜185”功率放大模块为单声道音频功率放大模块，自身带有

61.5mm×42.5mm×1.9mm 的导热铝板，如果在其后面再增加一块 200mm×150mm×4mm 的散热板（在接合处需涂上导热硅脂），在典型±33V、8Ω 负载下，不失真输出功率就可达到 45W，最大输出功率可达 75W。表 4-2 为“傻瓜 185”功率放大模块的技术参数。

表 4-2 “傻瓜 185” 功率放大模块的技术参数

技术指标	参数	单位	技术指标	参数	单位
工作电压	±15~±35	V _D	电压增益	30	dB
保护电压	±38	V _T	输入阻抗	17	kΩ
额定负载	8	Ω	过压限流	0.5	A
最大功率	75	W	过热限流	1.5	A
静态电流	20	mA	过载限流	3.5	A
失调电压	≤15	mV	散热器	≥200×150×4	mm
频率响应	10~30	kHz			

（二）制作指导

“傻瓜 185”功率放大模块的安装十分方便，无需印刷电路板即可直接安装，安装方法如图 4-4 所示。它本身有两个 70mm 的安装孔，将“傻瓜 185”功率放大模块与散热板用螺丝固定即可。OCL 功率放大器工作的效率一般不超过 50%~60%，当要求“傻瓜 185”功率放大模块的输出功率大于 45W 时，就会有一定的散热，而热平衡

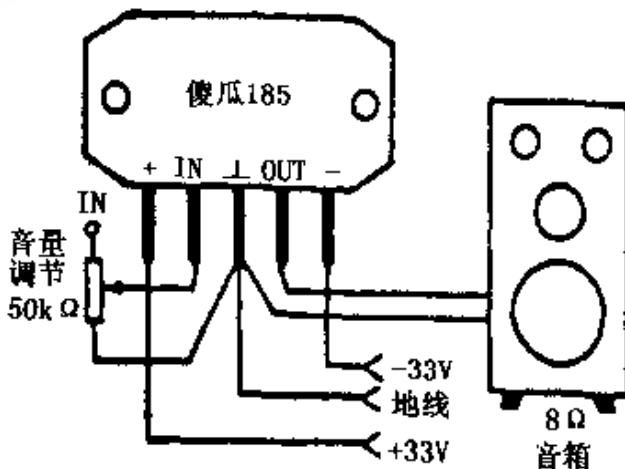


图 4-4 “傻瓜 185” 功率放大模块的安装示意图

要求其温升不大于 65°C ，如果散热器过小，就会造成模块温度上升，导致其性能下降，甚至损坏。

在考虑电路时应使各项参数都在“傻瓜 185”功率放大模块的参数之内为佳，建议使用电源电压在 $\pm 28\sim 33\text{V}$ 之间。单声道使用时，变压器的电流容量大于 3A ，双声道则再加倍。音源的信号电压控制在 300mA 以内，音箱的阻抗以 8Ω 为佳。

(三) 注意问题

变压器的次级输出电压不要超过 $2 \times 25\text{V}_{\text{AC}}$ ，若机器工作一段时间出现大信号时的削顶尖失真，则说明散热器的面积偏小，需要进一步加大。

“傻瓜 185”功率放大模块不具备输出短路保护，在安装操作时切忌将输出引线短路。

三、LM3886 功率放大器

(一) 电路特点

LM3886 是美国 NS 公司推出的功率放大集成电路，它能够在 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 的频率响应之内 (4Ω 负载)，输出高达 68W 的平均功率。其自身内部带有瞬间峰值保护电路，可使集成电路工作于安全的工作状态，且只要按照电路安装元件，无需进行调试即可正常工作。表 4-3 为 LM3886 的主要参数。

表 4-3 LM3886 的主要参数

参数名称	工作条件	典型参数值
电源电压静音衰减	最大 $\pm 42\text{V}$ ③脚开路或 0V 为静音 ④脚输出电流大于 0.5mA 为无静音	$\pm 35\text{V}$ 115dB
输出连续平均功率	$\pm 28\text{V}$ ，负载为 4Ω $\pm 28\text{V}$ ，负载为 8Ω $\pm 35\text{V}$ ，负载为 8Ω	68W 38W 50W

续表

参数名称	工作条件	典型参数值
峰值输出功率		135W
总谐失真	60W, 负载为 4Ω 30W, 负载为 8Ω (20Hz~20kHz)	0.03% 0.03%
转换速率	输入 2V, 上升时间为 2ns	19V/ μ s
总静态电流	±20V, $t_{on}=10ms$	50mA
最大输出电流		11.5A
信噪比	60W, 1kHz	110dB
增益带宽积	±30V, 100kHz, $V_i=50mA$	8MHz
互调失真	60Hz, 7kHz, 4:1	0.004%

图 4-5 为 LM3886 的应用电路原理图, 图 4-6 为其实际安装的印刷电路板图。

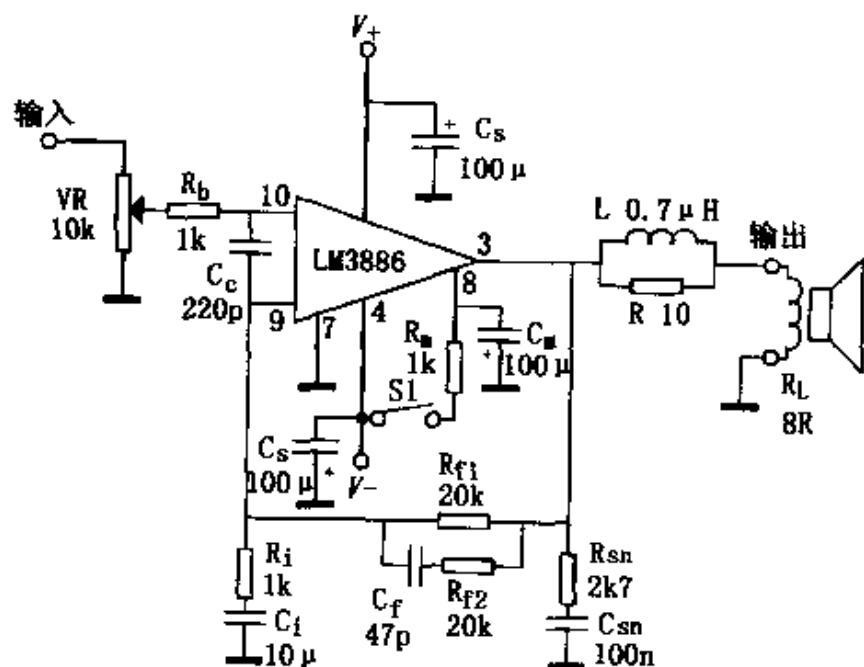


图 4-5 LM3886 的应用电路

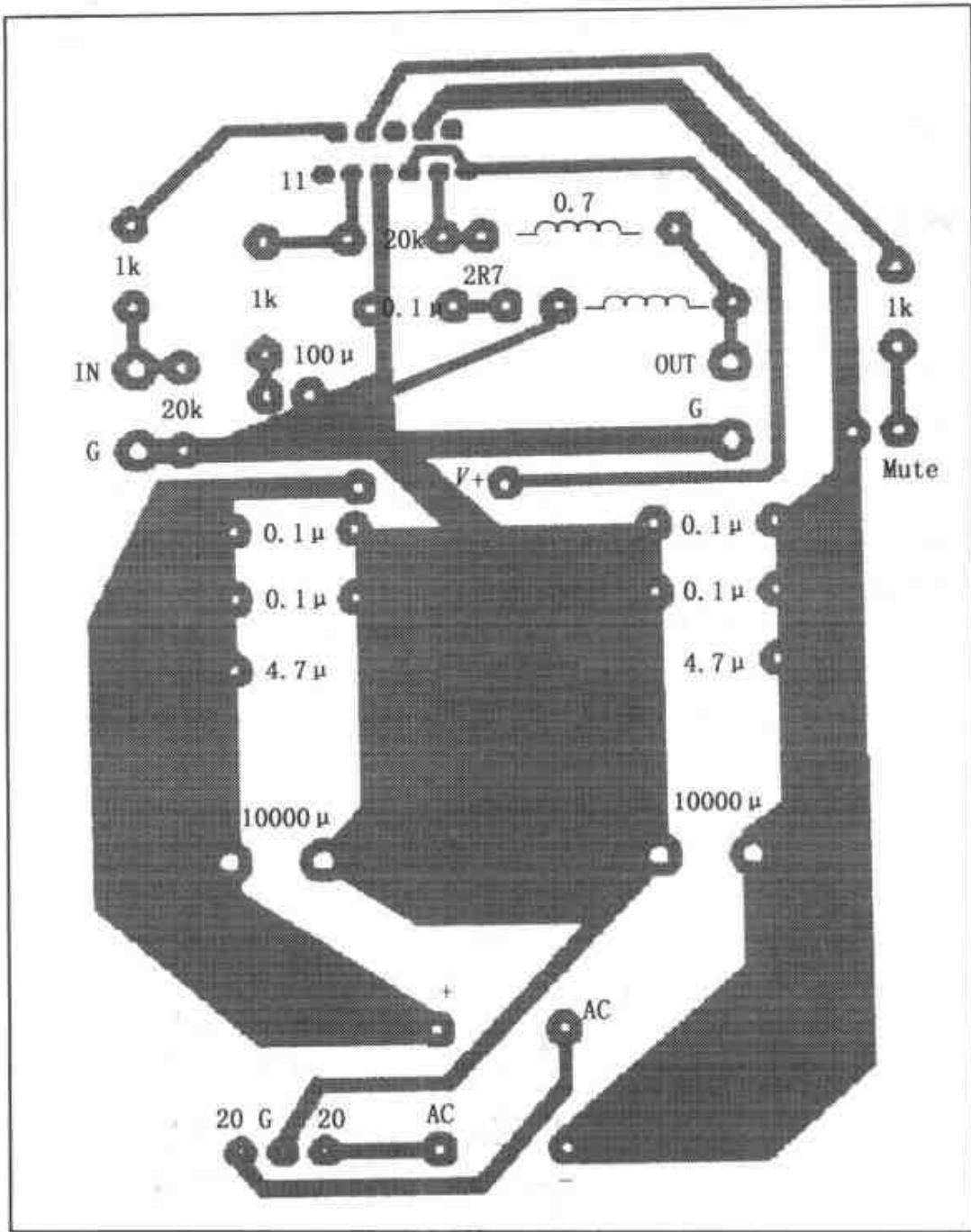


图 4-6 LM3886 实际安装印刷电路图（包括电源）

（二）制作指导

制作时只需要按照印刷电路板上的元件采购，并按照印刷电路板上所标注的位置安装，即可正常工作。

由于此电路仅作为后级使用，故在输入及接地端间加上一 $20\text{k}\Omega$ 的电阻，这是因为 LM3886 的正反相输入端有电流才能平衡，原本

加上 V_R 时，自然构成正相输入端的电流回路，现在少了 V_R ，回路断裂，输出电压就不平衡，未有任何输入信号即产生强大的电流输出，这样喇叭会发出刺耳的声音。

按图将印刷电路板制作完成后，即可进行元件的焊接。焊接时可将零件先插上再焊接，从最小的零件焊起，零件尽量贴紧电路板表面，电解电容要注意正负极性，否则会被击穿，金属膜电容没有极性的分别，但最好朝同一方向，这样比较整齐美观。靠近 LM3886 的三只 $0.1\mu F$ 的电容是旁路电容，越靠近 LM3886 越好，其他的电容则为滤波电容。由于电解电容在高频上表现不佳，所以加了 $0.1\mu F$ 及 $4.7\mu F$ 两组塑料电容来改善体质，找不到可用相近的来替代，耐压越高越好，其原则是与 $10000\mu F$ 的电解电容依大、中、小并联排列。

两只电感可用 18 号的漆包线在 $10\Omega 2W$ 的电阻上缠绕 10 圈，再将两端表面的漆刮去，焊在电阻的两只脚上。由于 18 号漆包线较粗不好绕，可将漆包线留长一段，从电阻的中间部位向两边各绕 5 圈，这样比较省力，绕起来也比较漂亮。图上这个电感值为 $0.7mH$ ，但一般市售的电感多半无法达到低直流阻抗的要求（可以从体形大略判断），而本例电感的要求是低直流阻抗，电感值的准确度还在其次，所以我们自行用较粗的漆包线来绕制电感。因为电感的直流阻抗太大，会阻挡信号的出路的，所以宁可不装电感（直接把 10Ω 电阻短路），也不要买那些芯片电感。

(三) 安装调试

电路中散热片的大小、样式可依自己的喜好购买，最好选购 $10cm \times 11cm \times 3cm$ 散热板。别让散热片接触机箱接地，因为 LM3886 的底壳与负电压接脚相通，不管是散热片或铜柱要固定在机箱上，记得要做好绝缘。铜柱及 L 架可依自己买的散热片型式及大小决定（因为 L 架的样式很多），散热片和 LM3886 间要涂上散热膏，帮助导热。

全部接好后就可以测试了，将音量转到最大，使用万用电表直如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。¹⁶³

流电压检测输出端，其电压应在 $0\sim0.2V$ (中点电压)。输出端理想值为零 (因为正负电源对称施加)，但零件必然有误差，所以略有电压输出。然后再把万用表调到交流电压最低挡，触摸输入端 (碰 IN 就好，不必碰到地)，给予一些人体感应噪声，这时万用表指针应该会摆动，如果测量出来的电压太大，就可能是输入端和接地间未接上 $20k\Omega$ 的电阻，把它接上后情形应能改善。

如果资金方面较为充裕，建议两个声道各用不同的变压器供电，以减少声道之间的相互干扰。

四、STK4191 厚膜集成电路功率放大器

(一) 电路特点

STK4191 厚膜集成电路常用于组合音响中，其电路组成如图 4-7 所示。它主要由话筒前置放大、唱机均衡放大、磁带辅助输入、音调放大和末级功率放大几部分电路组成。

电路中，厚膜集成电路 STK4191 作为末级功率放大电路，低噪声运算放大集成电路 TL082 担任前置放大和音调控制。本机供电直流电压取 $\pm 45V$ 。 4Ω 负载时，额定输出功率达 $50W+50W$ ，其音乐功率达到 $200W+200W$ ，左右路输出功率分别装有电平表指示。本机还装有高低音音调控制等响度电路。其高低音调节范围分别为 $\pm 10dB$ 。

表 4-4 为 STK4191 的技术参数，表 4-5 为 STK4191 各引脚的工作电压。

表 4-4 STK4191 的技术参数

名称	技术参数	名称	技术参数
电源电压	$\pm 52.5V$	中点电压	$-70mV \sim +70mV$
额定输出功率	$50W+50W$	静噪电压	$-5V$
谐波失真	0.3%	热阻	$1.8C/W$
频率响应	$20Hz \sim 20kHz$	结温度	$150C$
输入阻抗	$55k\Omega$	工作壳温	$125C$
输出噪声电压	$1.2mV$	允许负载短路时间	2s

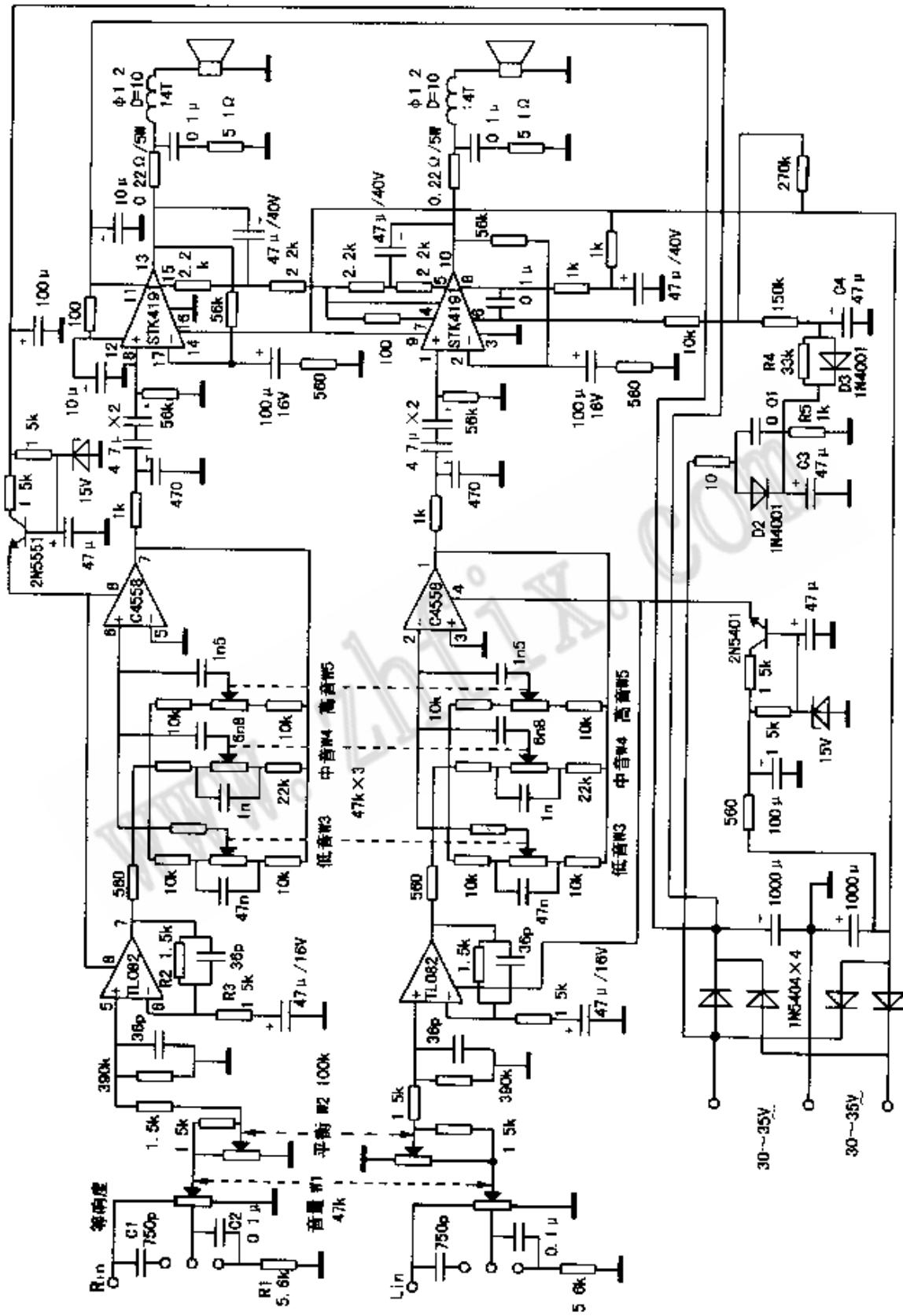


图 1-7 厚膜集成放电路 STK1191 的电路组成

表 4-5 STK4191 的各引脚的工作电压

引脚	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
工作电压 (V)	0	0	0	-40	-1.3	0	-43	-44	-44	0	+44	-41	0	-44	-1.3	0	0	0

(二) 制作指导

SKT4191 集成功放的印刷电路图如图 4-8、图 4-9 所示，它分为前置电路和功率放大电路二部分。电源变压器需要安装在远离话筒和唱机的输入端，以减小电源变压器的交变磁场对话筒及唱机输入信号的影响。话筒及唱机的输入插孔与印刷电路板之间的连接线应采用屏蔽线。

五、PASS 的“ZEN”功率放大器

(一) 电路特点

业余设计放大器有两个基本原则：一是简单，二是线性。一些复杂的设计的确能达到极佳的测量指标，许多商业上的设计采用了高达 5~7 级的增益电路，最小的也有 3 级，它们都能达到很高的开环增益，但线性很差。许多发烧友（包括 PASS），宁愿牺牲一些其他的性能去简化电路，但简单的电路也要保证其线性，其失真也要在一定的范围内。实际上，我们能做到最简单的放大线路就是单级放大的单端甲类了。

图 4-10 所示即为 PASS LAB 公司设计师 PASS 推出的名称为“ZEN”的单端甲类功率放大器。考虑到三极管输入阻抗太低，而电子管输入阻抗虽然很高，但其用于单级电路上增益太小，本机选用场效应功率管（MOSFET）。MOSFET 具有很高的输入阻抗和跨导，也能输出较大的电流，很适合用在单级的单端甲类放大器中。

图中 Q1 为增益级，Q2 为 Q1 提供恒定的电流。Q3 控制 Q2 的栅极电压。Q3 通过 R6、R7 获得电流，C5 吸收电源纹波。Q2 的电流通过 R1 产生压降，Q3 在压降为 0.66V 时导通，并控制 Q2 栅极。

高音

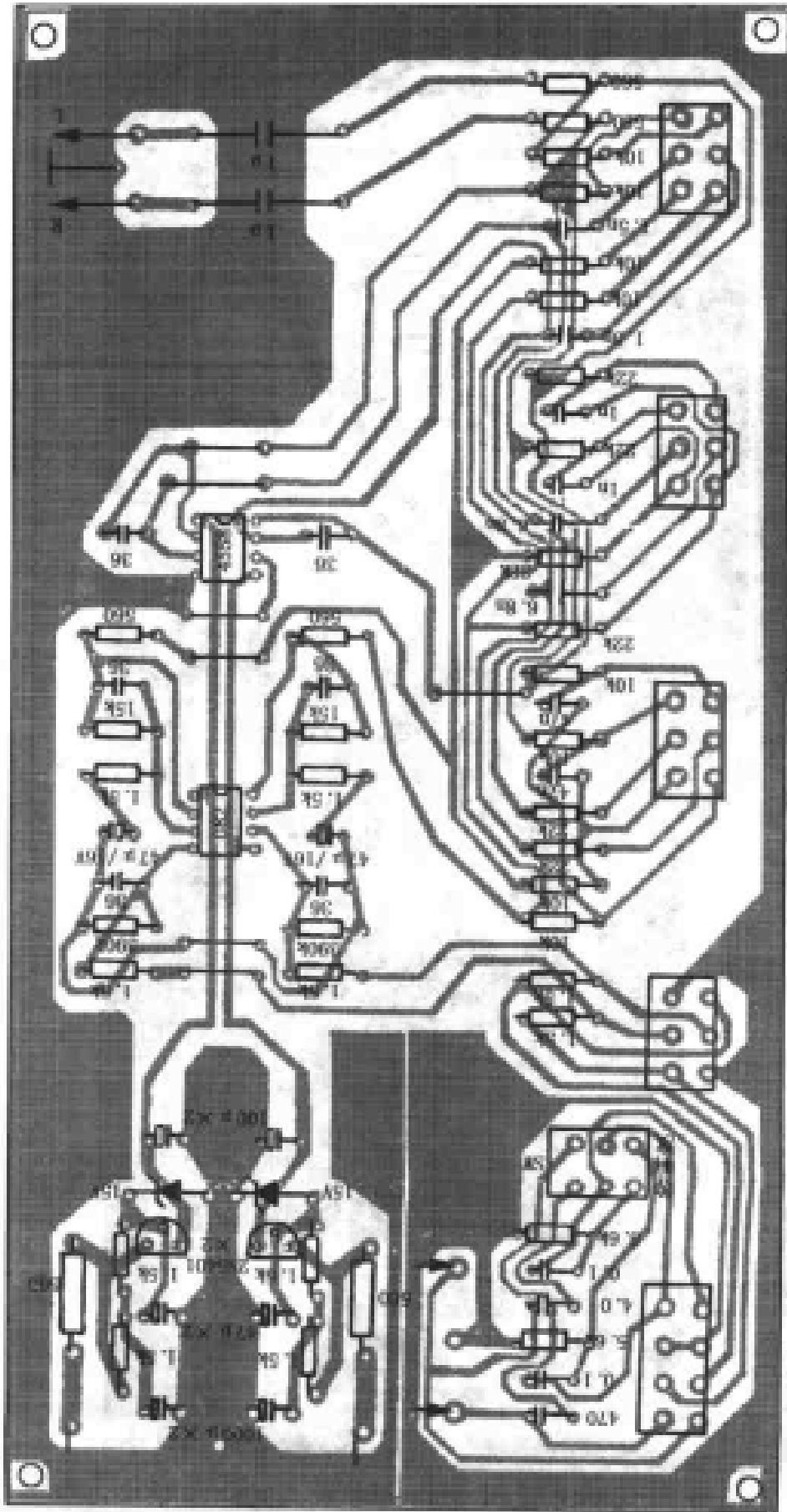
中音

低音

平衡

音量

图 4—8 SKT4191 的印刷电路图(前置部分)



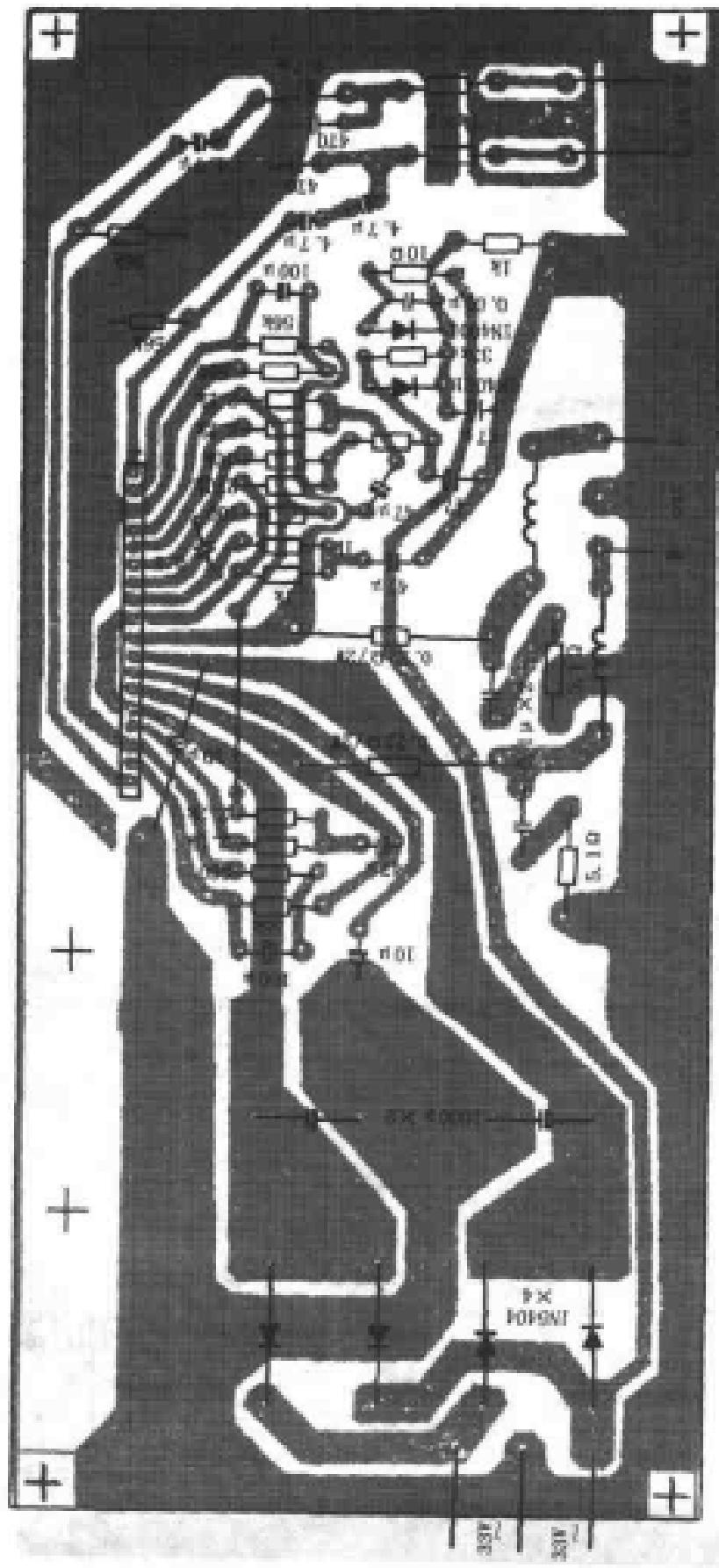


图 4-9 SKT4191 的印刷电路图（功效部分）

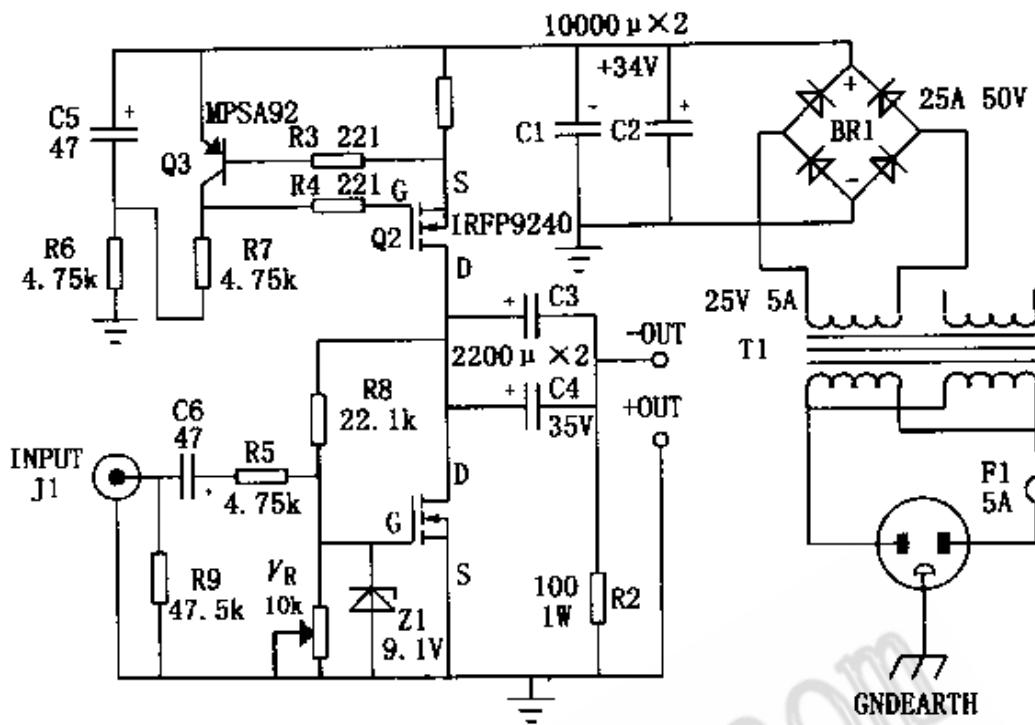


图 4-10 “ZEN” 功率放大器的电路图

电压为 4V 左右, Q2 电流变高时, Q3 电流也变高, 相应 Q2 的栅极—源极电压变低, Q2 的电流变低。这种反馈控制能稳定 Q2 的电流在 2A 左右, R3、R4 用来防止 Q2 产生寄生振荡。R8、 V_R 形成直流反馈并保持 Q1 的栅极电压接近 4V, 漏极电压接近 17V。

输入信号通过 C6、R5 进入 Q1 栅极, 输出信号通过 C3、C4 加到扬声器。稳压管 Z1 保护输入信号在 20V 内。

注意: 扬声器的正接电源的负极, 因为放大器是反相的。

(二) 元器件选择

电阻 R1 选用 0.33/2W, R2 选用 100/1W, R3 选用 221/0.25W, R5、R6、R7 选用 4.75k/0.25W, R8 选用 22.1k/0.25W, R9 选用 47.5k/0.25W。电容 C1、C2 选用 $10000\mu\text{F}/35\text{V}$, C3、C4 选用 $2200\mu\text{F}/35\text{V}$, C5、C6 选用 $47\mu\text{F}/25\text{V}$ 。有源器件 Q1 选用 IRFP140 N 沟道 Mosfet, MIN 50V/10A/125W, Q2 选用 IRFP9240 P 沟道 Mosfet, MIN 50V/10A/125W, Q3 选用 MPSA92 NPN, MIN 50V/

10mA/TO92。稳压管 Z1 选用 1N5239 9.1V，电位器 VR 选用 10kΩ，桥堆选用 BR1 25A/50V，保险丝选用 F1 5~6A 快速熔断保险丝，变压器选用次级 24~25V AC/5A。

每声道的散热器热阻为 0.3 C/W，过小的散热器会带来非常高的温升，并降低功率器件的寿命。变压器为每声道 25V 6A，虽然只需要 2A 的直流电流，但大的备用是需要的，并能显著提高音质。建议每声道用分别的变压器，至少也要使用两个次级的变压器，以减少干扰。

(三) 制作指导

图 4-11 及图 4-12 所示为本机的印刷电路图和元件排列图。按图示元件安装完毕后，接上电源，如果保险丝没有断，R1 大约会有 2V 的压降，中点的电压也大约为 17V，接上 8Ω 负载和输入信号，调整 VR 使中点电压为 17V，温度稳定后，再调整一次。

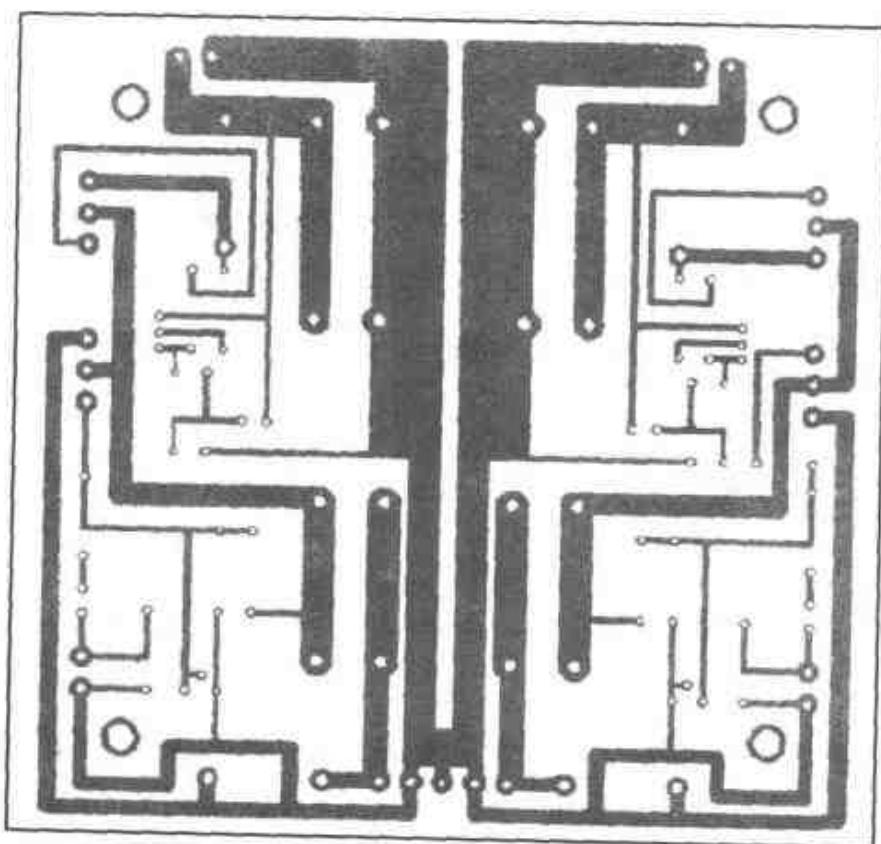


图 4-11 “ZEN” 功率放大器的印刷电路图

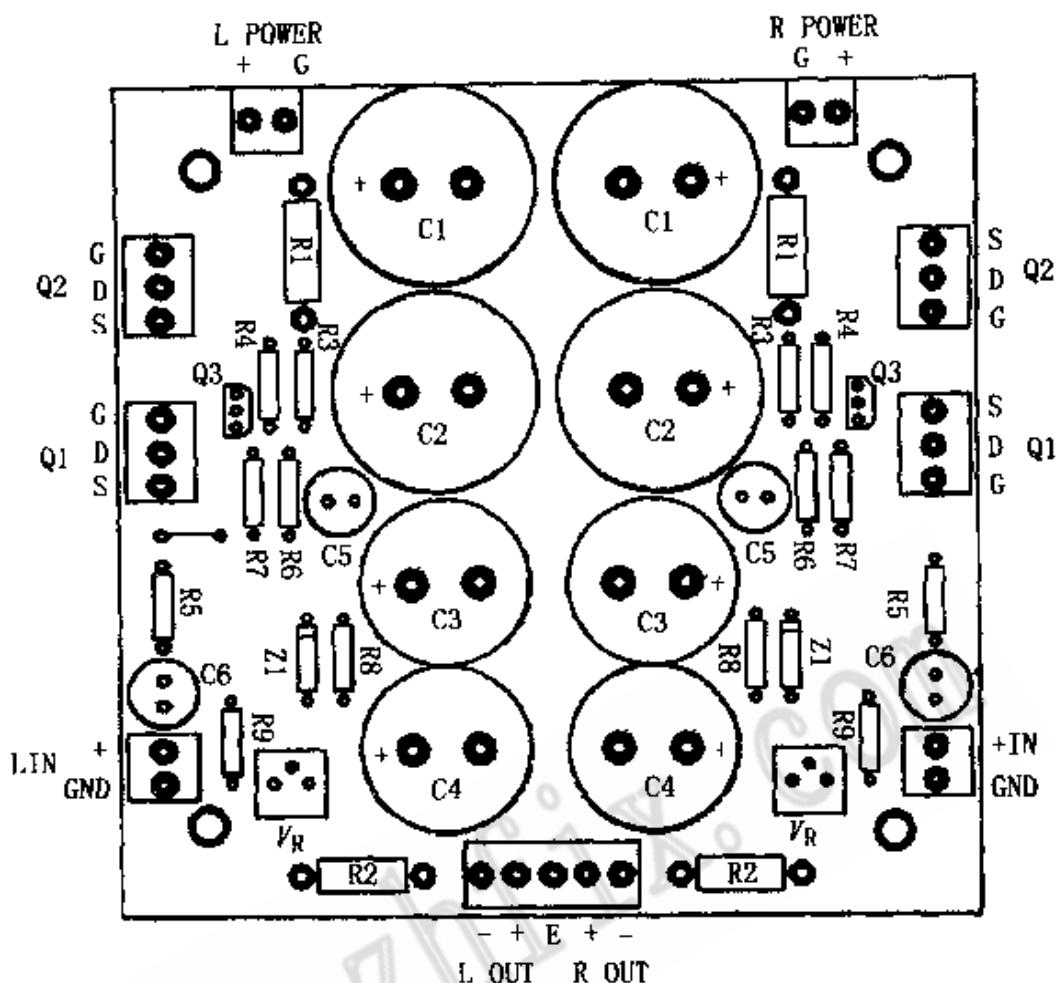


图 4-12 “ZEN” 功率放大器的元件排列图

输出阻抗大约 1Ω (阻尼系数为 8)，因此要选择灵敏度低、大功率(超过 $10W$)扬声器，本放大器不能接 4Ω 的扬声器。如果你要配 4Ω 扬声器，建议使用两个放大器并联。

六、Marantz9（马兰士）功率放大器（仿制）

（一）电路特点

Marantz9（马兰士）功率放大器是一款著名的电子管功率放大器，其电路如图 4-13 所示。V1A 是相位转换级，由低噪声双三极管 6DJ8 的一半来担任，本级无放大作用，电路增益为 1。V1A 的信号栅极上有一切换开关 ST9，可以选择输入的信号是直入放大，或者

是经过一选频网络再进入放大，此网络对极低频（人耳不可听闻的20Hz以下）有截止的功能。因为在Marantz9电路中前三级是直流放大，信号中如果存在极低频的成分，电源电路的去耦电容器是无能为力的，会造成极有害低频自激。V1A的输出回路有一开关ST3，其作用是改变输出到扬声器上的音频功率的相位。切换ST3可使输出信号相位倒转 180° 。这对校验音箱系统是很方便。另外ST3的相位功能还能使Marantz9由一台立体声功放($75W \times 2$)十分简便地转换成大功率单声道功放。

第二级是电压放大级，用6DJ8的另一半，全机的电压增益主要靠此级完成，整机的大环路负反馈也是从它的阴极电阻上引入。本级放大后的信号以直接耦合的方式输出到下一级（倒相级）。

倒相级的电子管也是用6DJ8。它采用了广泛应用的阴极耦合式（长尾式）倒相电路。再往下是激励级，用6CG7作阴极输出器，推动功放管做功率放大。与倒相级直接推动相比，阴极输出器具有很低的阻抗和失真，从而有更优越的激励特性，为末级输出强劲的功率奠定了基础。

功率放大级用名胆EL34或6CA7两两并联做AB1类推挽放大，单声道要用4只电子管。2只电子管并联相当于一个具有崭新特征的电子管：内阻及负载阻抗是原来的 $1/2$ ，即负载阻抗低至 1700Ω ，阻尼特性更优良；互导为原管的2倍，达到 $220mA/V$ ；工作点方面，栅负压不变，阳极、第二栅极高压不变，阳极和第二栅电流增大一倍；输入电容、输出电容、过渡电容均增大一倍。但因为内阻降低，且在音频段工作，这些电容量的增大不会影响到高音频特性的衰减。并联后两管的特性曲线互补，合成趋于理想的曲线，这是Marantz9音质优秀的重要原因之一。输出功率增大约一倍。

末级设置了功能转换开关S，使功放电路能工作在三极管—超线性五极管两种状态，兼顾对音质和音量的不同需要。功放电子管的输入栅极回路上还设有 $150pF$ 电容器和 $68k\Omega$ 电阻的频率高通网

络，可以改善波形的上沿速率，对整机的功率输出的速度感有利。

Marantz9 有复杂而完备的负反馈网络。大环路负反馈信号从输出变压器的专门绕组引出，送入电压放大管的阴极。大环内还套着小环，Marantz9 功放管的阳极有一小电容将高频的反馈信号输入倒相管 6DJ8 的信号栅极，V1A 的阳极上还有一个校正反馈平衡的回路。小环的反馈基本消除了高频相移，使大环路反馈的质量大有提高，从而获得纯洁的音质。

各级都施加有自身的电流负反馈。第一级的阴极负反馈使此级增益为 1，倒相级是深度负反馈作用的阴极倒相器，激励级是 100% 负反馈的阴极输出器。4 只功放管阴极上的 24Ω 电阻也有相当的电流负反馈作用。这些局部负反馈不存在相移失真，瞬态反应好，为整体的高音质作出举足轻重的贡献。

Marantz9 的电源比较简单。高压 440V 由倍压整流获得。倍压整流相当于两个半波整流电路的叠加，具有简单可靠的优点。电子管 V1、V3 和 V4 的阴极电压都比较高，为此在它们的灯丝不接地而加有 40V 的直流电压，降低了灯丝与阴极间的电压差，可以防止灯丝与阴极的漏电和击穿，同时对降低交流噪声也有好处。

仿制的 Marantz9 电路图 (RM9) 如图 4-14 所示。取其精华，量力而为，是仿制的宗旨。从图中可以看出，RM9 电路与 Marantz9 基本相同，不同的是 RM9 少了相位转换级，原来复杂的负反馈网络用普通的负反馈环路来代替，输出变压器无专门的反馈绕组，结构也相应简单了，当然电子管和其他元件全部采用国产型号。此外 RM9 以现代胆机的观点，加强了电源级的性能。

电压放大级 V1 用高频低噪声双三极管 6N3 双管并联工作，整机的电压增益主要由此级来保证。实践证明此电路音质比较醇和，适合于 EL34 这样音色清丽的功放管。

输入端有两组 RCA 插口，用小型拨动开关来转换，可满足实际的应用（一般只要 CD 和 VCD 的切换选择就够了），避免了专用前

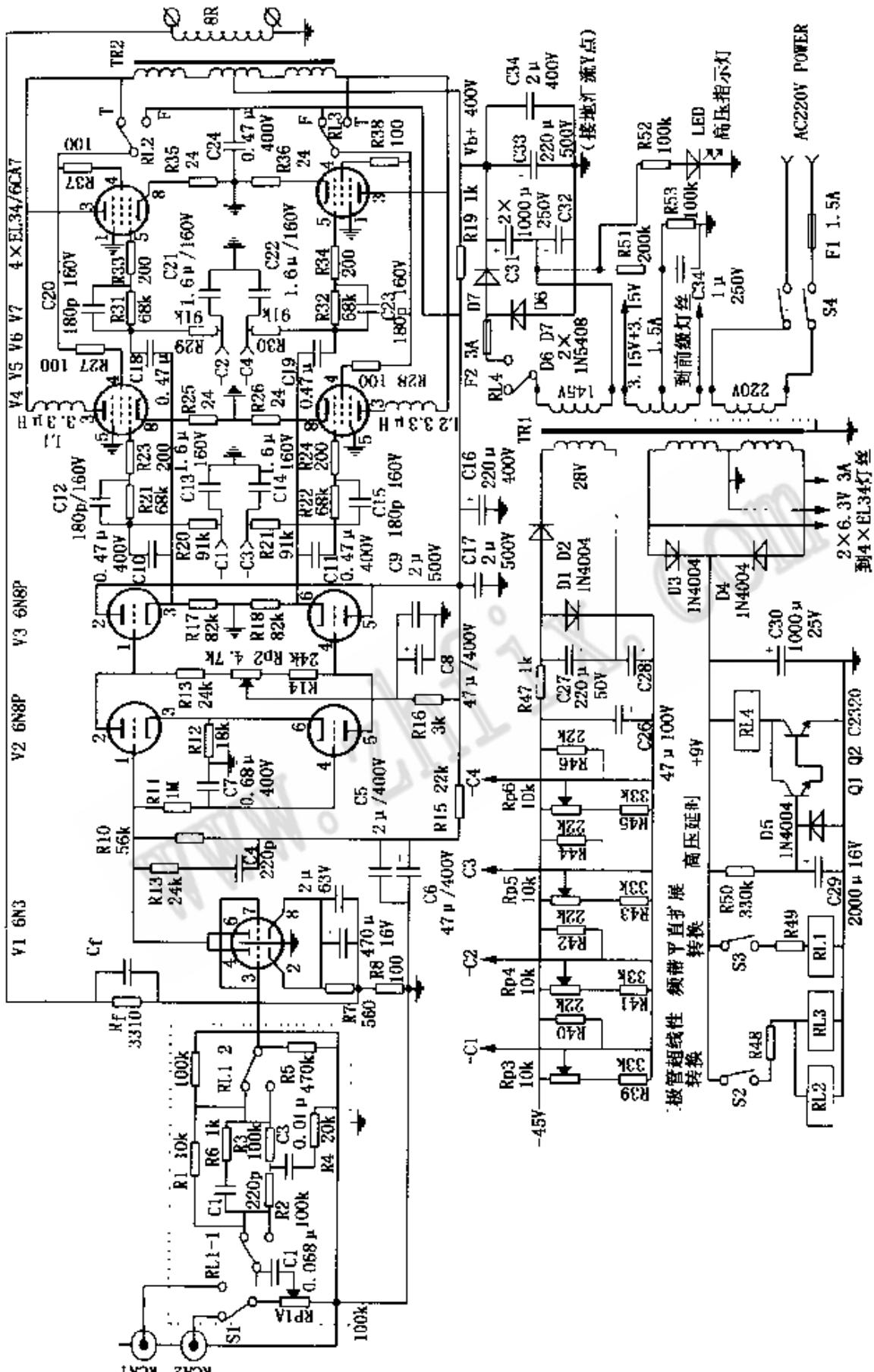


图 4—14 仿制的 Marantz9(RM9)电路图

级冗长的切换线路对音质的损害。输入级还附加了一个频率扩展电路，用一个 2×4 的继电器控制。切入“频率扩展”位置时，100Hz 和 10kHz 处分别提升 6dB（不必太大），特性曲线在高低两端稍有上抬，使信号频带得以有效扩展。切入“频率平直”位置时，“原汁原味”的信号直入放大器。

以上的功能相当于 RM9 内置了一台素质不俗的无源前级，省去了配置高档前级机的大量投资。如果制作者为求简单，也可省去这部分电路，此时整机增益应稍降低，不妨免去 6N3 的阴极电容器，对音质有些益处。

倒相级和激励级与 Marantz9 相似，选用 6N8P (6SN 7)，代用的国产产品中有小九脚 6N6 能胜任，而 6N11 的阳极功耗稍微小些。

前置的 3 只电子管组成无交连电容的直流放大器，不存在相位失真，信号输出可达到尽善尽美的状态。直流放大对整机的失真及听感的改善贡献很多，但其工作点互相牵制。为了防止漂移，所用的元件必须质量优良，长期工作在 105°C 的环境下稳定性好，尤其是领头 V1 的质量，选管必须慎之又慎。

功率放大级用国产的 EL34/6CA7，品质令人满意。RM9 推挽功放管的功能状态转换改为三极管—五极管的选择。以经典五极管状态取代 Marantz9 所用的超线性状态，是因为无论在音质或输出功率方面，超线性都与三极管状态区别不太明显。国产 EL34 并联的直流工作电压为 400V 时，五极管状态下输出功率最大可达 80W，比超线性工作状态大 20%。RM9 的这种功能选择，使得我们在欣赏音乐时选择三极管工作状态 ($35W \times 2$)，音质纯洁甜美，在家庭影院和卡拉OK 娱乐时选择五极管工作状态 ($75W \times 2$)，音量充沛，力度强劲，鱼与熊掌都可兼得。

功放管可以用 KT88 来直接代用（当然要重调偏压，其输出功率大些，声音比较醇厚）。国产 KT88 的耐过压性能弱，最好降压使用。

全机的 5 只耦合电容器要求使用优质聚乙苯二甲酸酯或聚丙烯

电容。输入电容器 C1 的容量不能过大，更不能省去，以免超低音频干扰通道直流放大器。并联在滤波去耦电解电容器也要选用聚丙烯电容，至少也要用聚酯电容器。信号通道中的电阻（涉及信号电压）最好能选用质量好的品牌，通道的连线应用无氧铜或镀银线。此外印刷电路板的质量、焊锡的成分也对音质有可以觉察的影响。除此以外，其他元件可以用一般的元件，好钢要用在刀刃上，不顾实效地滥用发烧补品会使制造成本大幅上升。

每声道要用 4 只 EL34，由于双管并联特性曲线互补，要求功放管两两配对。

电源电路与 Marantz9 的差异较大。RM9 在这方面作了功能上的扩充。RM9 的高压电源仍然采用倍压直流的方式，它有如下的优点：

(1) 变压器的整流电压只有全波桥式整流的一半，线圈绕制容易简便，特别适合业余制作。

(2) 变压器散热条件改善，绝缘处理容易，可靠性高。胆机电源变压器故障大都发生于全波或桥式整流的高压线圈，而倍压整流变压器因线径较大和电压较低，故障率远低于其他类型变压器。

(3) 直流滤波电容器的耐压是普通整流电路的一半，可以选用较低耐压的优质补品电容器，不必再去追求耐压 500V 以上的昂贵的电解电容器。

400V 高压采用延时加载、用晶体管 RC 延时电路来实现，最基本的电路也是可靠的。高压延时加载的功能是防止电子管冷发射造成阴极中毒和短命，以及防止过高的空载电压去冲击电子管的栅极和电容器，对器件造成损坏。在整流电压较高的半导体二极管电路里，高压延时加载是不可不用的。

负偏压部分也是采用倍压整流供电，偏压调整的电位器应该可靠性良好，这里选用 W22 型带锁位的半密封电位器。整个负偏压电路的元件和接线都要求高可靠性，因为这里一有闪失就会使功放管

失去栅负压而烧毁。

高压滤波不设铁心扼流圈，因为残留的交流脉动电流在输出变压器里是同量反相的，相互抵消后对交流声影响已极微。实际上本机在离扬声器 10cm 处交流噪声已不可听到。省去扼流圈的好处是高压电源的内阻减少，响应速度快，也可使整机的重量、成本和电耗都显著降低。

如果说扼流圈对电路的音色有影响，那么这个影响程度也远不及滤波电解电容器品质所致。C33 (22μF/500V) 最好选用电解电容器，或者用大容量的聚丙烯电容器。C34 (2μF/ 600V) 也要选用 MKP 等有机膜电容器。这些元件直接影响推挽功率放大器的音质。

(二) 制作指导

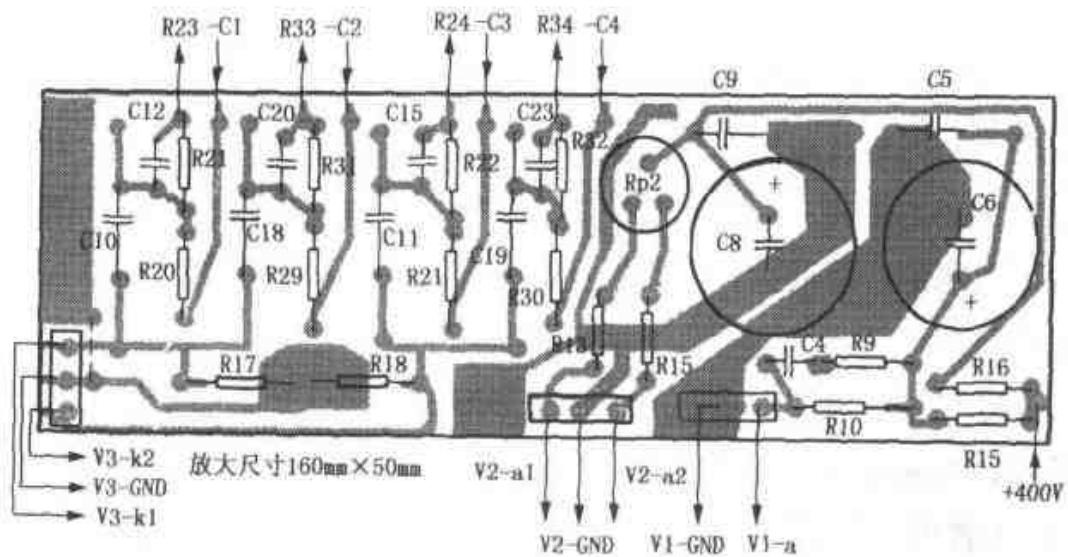
放大和电源部分的印刷电路图如图 4-15 所示。对于业余制作者来说，建议单声道形式装机，这样制作容易，重量较轻。用铝合金材料制成外壳，机座结构简图如图 4-16 所示。

焊接形式采用印刷电路板与搭棚结合。安装焊接按如下次序进行：电源变压器、灯丝连线、继电器控制线、电源印刷板、输出变压器、电子管座周边的元件、地线、通道印刷板。

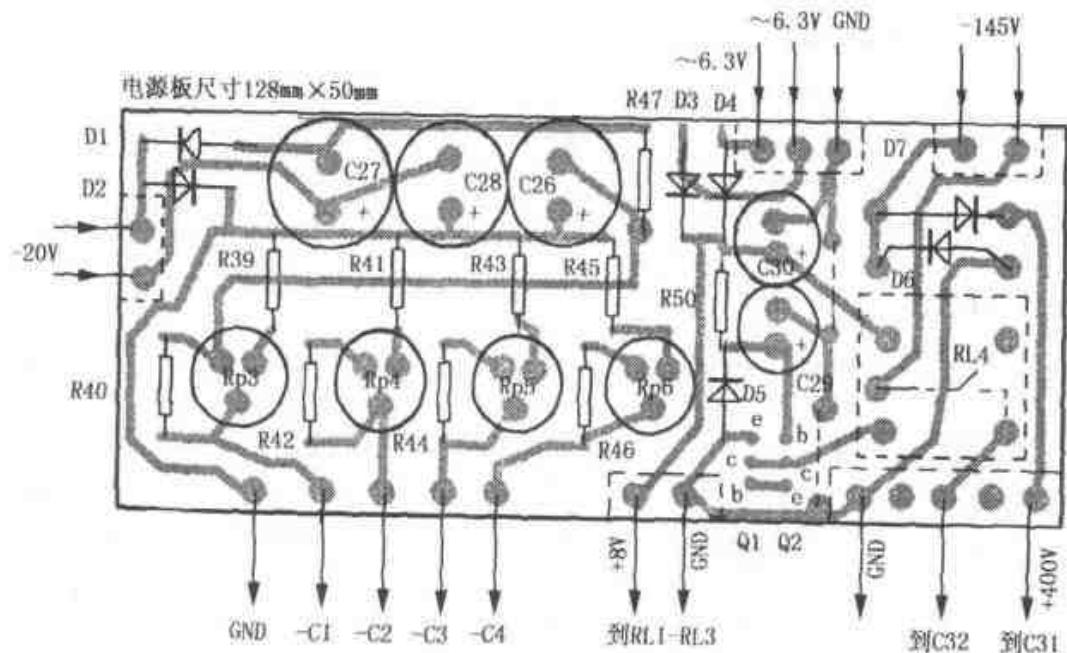
除了通道印刷板和电源印刷板已布置的元件以外，其他元件要在管座附近就地搭棚接线。本机采用星型接地方式。电解电容器 C32、C33 的负极焊一块小敷铜作地线的汇流点(Y 点)。电子管 V1~V7 利用接地的管脚作为本级的接地点，V2、V3 无接地管脚，要在附近设一个本级的接地点。各级的接地元件焊入接地点后再用粗的引线接到 Y 点，Y 点有一引线连接机壳，如图 4-17 所示。如此接地方式使地电流互不干扰，避免了普通接地方式日久后内阻增大而导致交流噪声的产生。

(三) 安装调试

整机焊接完成后应一丝不苟地核对元件与接线，确认正确无误后，进入调试阶段。



(a) 放大电路



(b) 电源电路

图 4-15 RM9 放大和电源部分的印刷电路图

1. 通电前检查

通电试机之前，以下几点务必要做好：(1) 直流 400V 高压不能短路，用万用表红笔接地、黑笔接 B+ 处，量得阻值应大于 $100k\Omega$ ，否则排线错误或元件漏电等， $-60V$ 负偏压电路亦然。(2) 高压电解电容器及整流二极管的正负极性不可接反，否则有爆裂高压电容

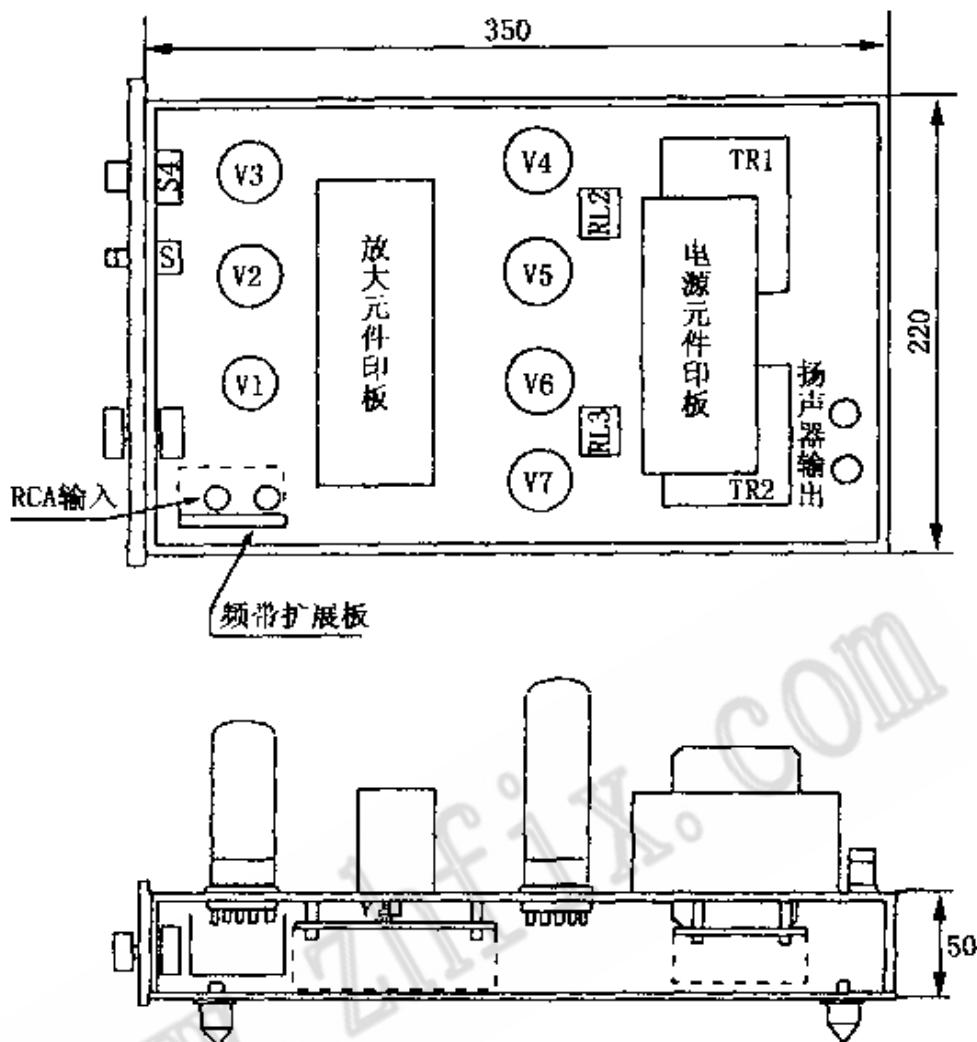


图 4-16 RM9 的整机结构示意图

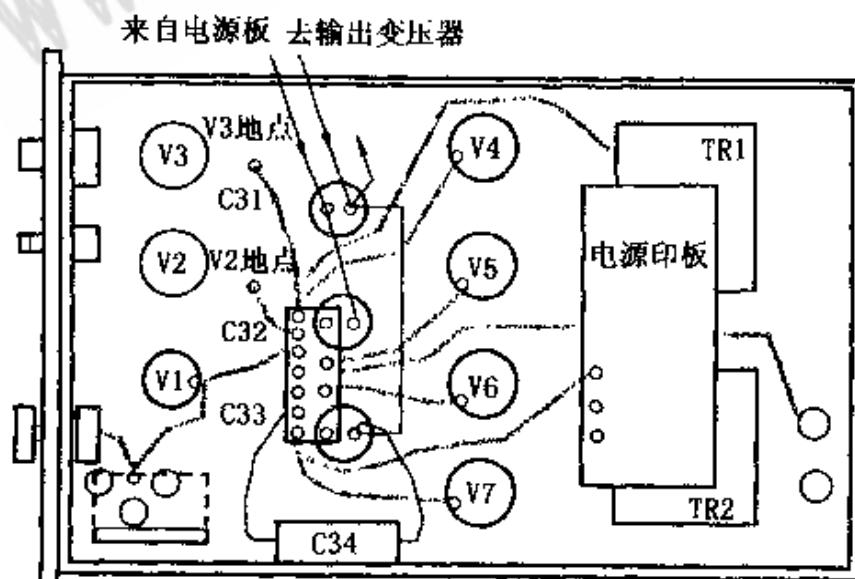


图 4-17 RM9 的内部电路接地方式

如果你觉得本书很好，请浏览后删除并购买原版书籍阅读。

器的危险。(3)要确认接好了扬声器，胆机与石机相反，负载怕开路而不怕短时间短路，负载开路会形成音频的过高压而击穿输出变压器。(4)通电前还要把负反馈回路暂时断开。

2. 低压电源调试

拔去电源印刷板上的交流 145V 高压插头后通电，此时除了 400V 高压外其他电源负载都可以工作。各电子管灯丝呈现殷红色，测量交流 6.3V 灯丝电源及负载正常。约 45~50s 后听到继电器 RL4 的吸合声，表明高压延时加载电路正常。调节负偏压电位器 RP3~RP6，使 $U_{c1} \sim U_{c4}$ 的电压为 -35V，再测量 V4~V7(5)脚（栅极）皆为 -35V，表明功放管的偏压系统正常。拨动 S2 或 S3，相应的继电器 RL2、RL3 或 RL1 动作，表明功能转换电路正常。

3. 高压电源调试

插上电源印刷板上的交流 145V 高压插头，再通电，灯丝预热约 45~50s 后 400V 高压自动加载。此时指示灯 LED 亮，功放管内有微弱的蓝色光，喇叭或许有微小的交流哼声，这说明整机电路大致正常。如果出现异常现象（冒烟、跳火、功放管阳极发红、交流声很强等）应立即关机，重复上述两步的检查。

4. 工作状态调整

在直流高压系统基本正常后进入静态工作点的调整阶段。

(1) 设定功放管的静态电流。细调 RP3~RP6，使 4 只 EL34 的阴极电流为 40mA，即各级阴极电阻 (24Ω 取样电阻) 的电压值为 0.96V。

(2) 设定三级直流放大的工作点，此项调节直接影响整机的最大输出功率和动态范围。细调 RP6，使 U_{bk3} (V3 上半管的栅负压) 的电压为 -7V， U_{bk3} (V3 的栅负压) 为 -6V。待整机工作稳定正常后用固定电阻代替 RP6。由于是三级直流耦合，有一定的调整难度。调节 RP6 实际上要同时满足 4 个条件：V1 阳极电流大于 5mA；V2、V3 的栅极对阴极电压 U_{gk2} 为 -7V； U_{gk3} 为 -6V；阳极电流大于

3mA。这几个指标互相牵制，不过只要按照 RM9 原理图的元件数值安装，被调参数都会在受控范围之内。

(3) 调整推挽输出波形的对称性。借助示波器细调 RP2，此项调节主要影响整机的失真系数。从 RCA 输入插口注入 1kHz 的标准正弦波，使其达到额定功率输出。用示波器观察输出端（用电阻负载代替扬声器）的上下两半波形，调节 RP 使波形完全对称相等。如果无信号源和示波器，就要确定 V3 的两个负载电阻 $R_{14}=1.15R_{13}$ ，使上下波形基本对称，再靠负反馈功能来自动纠正完善。

完成这 3 个步骤的调整后，整机已能在反馈开环的状态下正常工作。

(4) 负反馈回路相位的调整。接通负反馈回路再开机，输入音乐信号，此时如果声音变大了或者出现有音频自激，则说明反馈相位错了，应该把输出变压器的二次侧线掉头反接。负反馈正确的表现是加入后声音变轻，交流哼声和其他噪声大大降低乃至消失。

以上调整工作完成后便进入试听阶段。试机开始，新电子管初啼之声是非常难听的，可能会使你大失所望，误以为是制作上的失败。但在开机 10 小时以后，那声音便慢慢醇和起来，再过一段时间，纯真甜美的胆味音质就会令你激动不已。煲机 24 小时后再重新精调一次各工作点，此时制作已告成功，RM9 正式启用。

七、纯甲类功率放大器

(一) 电路特点

本机是一款具有胆机风味的石机功放，由场效应管和双极性三极管共同组成纯甲类后级放大器。功放采用了典型的 OCL 功放电路，为全互补对称式纯甲类 DC 结构，功放的每一级放大均工作于甲类状态。输入级和电压放大级采用线性较好的渥尔曼电路，差分管及电流推动管分别为 K389、J109 李生对管和 K214、J77 中功率 MOS 管，功率输出级为每声道三对日本原装 2SC5200、2SA1943 大

功率东芝管并联输出，功率强劲，驱动阻抗 2Ω 的喇叭也觉轻松自如，毫不费力。

电源部分较为简洁，双35V交流经简单的整流滤波即可得到 $\pm 50V$ 的工作电压。负反馈电路对功放的音质有较大影响。为了让读者体验到采用不同的负反馈方式所带来的不同放音效果，本功放设有多种负反馈电路可供选择。

本机印刷板采用CAD辅助设计的单面镀银、镀镍板。每声道完全独立，互不牵涉。除电源变压器外，左右声道所有元件均设计在两块完全对称，又相互独立的印刷板上，方便做成单、双声道纯甲类功放。

图4-18所示即为本机电路图。R1为输入耦合电阻，对输入信号有缓冲作用。R2决定功放的输入阻抗为 $100k\Omega$ ，C1对输入信号中的超高频成分起旁路作用，将超过 $20kHz$ 的高频拒之门外。输入级差分管Q1、Q2的性能关系到整机的稳定性，与音质也息息相关。因此，我们选择了一致性很好的东芝孪生对管K389、J109作差分放大。每只差分管的工作电流设定为 $2mA$ 左右，N管与P管之间通过VR1互为负载，省去了通常的恒流源，简化了电路。由于结型场效应管的工作电压较低，不能直接工作于 $\pm 50V$ 电源下，故采用了东芝双极型孪生对管C3381、A1349（图中的Q3、Q4）与Q1、Q2接成渥尔曼电路，使K389、J109工作于安全电压范围内，同时拓宽了频响和动态，提高了线性。R3与R5、R4与R6分压，为Q3、Q4基极分别提供约 $\pm 16.3V$ 的基准电压。Q1、Q2的工作电压实际在 $\pm 15V$ 左右。

R7~R10为Q3、Q4的集电极负载电阻。R7、R8上的压降为下一级——电压放大级的Q5、Q8提供偏置。由于渥尔曼电路具有失真低、频响宽、增益高、线性好等特点。本机电压放大级亦采用了渥尔曼电路。Q5、Q8接成共射极放大，Q6、Q7接成共基极放大，渥尔曼电路也称共射—共基电路。我们把这一级的静态工作电流设

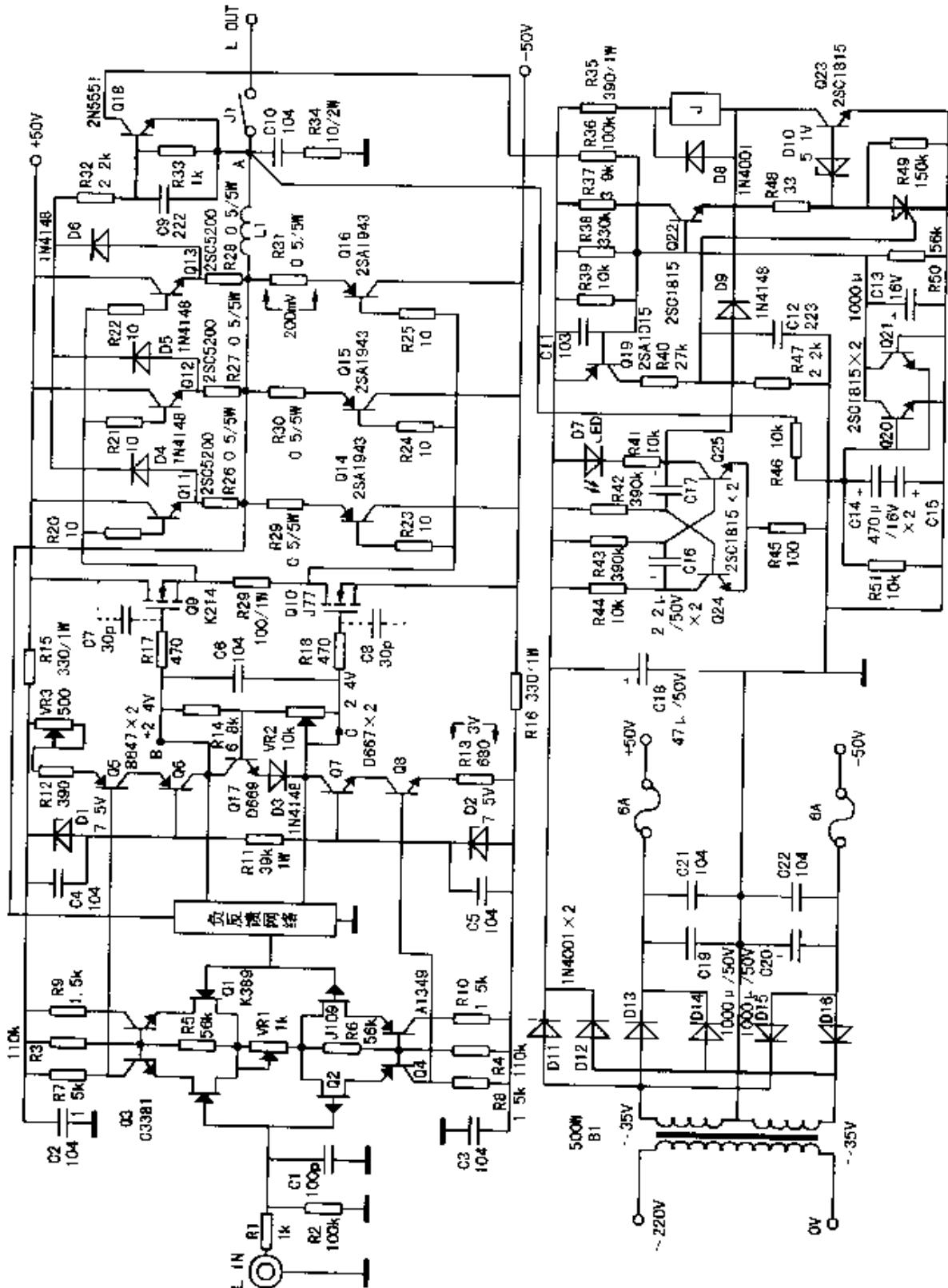


图 4-18 纯甲类功率放大器电路图

定为 4~5mA。D1、D2、R11 为 Q6、Q7 的基极提供基准工作电压。正、负周期的音频信号由 Q6、Q7 的集电极输出经 R17、R18 缓冲送至 Q9、Q10 棚极。R15、R16 为低频退耦电阻兼限流作用，C2、C3、C4、C5 为高频去耦电容，可降低电源的高频内阻，防止由电源高频内阻过大引起的自激振荡。D3 用作温度补偿，补偿因气温变化而引起的功率管静态电流的不稳定。D3 又与 Q17、R14、VR2 等组成恒压电路，调节 VR2 可改变 Q9~Q16 的静态工作点。C6 可防止交变信号对 Q17 的影响。Q9、Q10 为电流推动级，其静态电流设定为 70mA。由于其为电压控制器件，棚极输入阻抗高，当静态电流调大时，可能会产生寄生振荡，制作中如发现自激，可在 Q9、Q10 的棚漏之间并上 C7、C8。

R19 为 Q9、Q10 的源极负载。Q11 与 Q12、Q13 并联，Q14 与 Q15、Q16 并联，同 Q9、Q10 一道组成达林顿输出级驱动喇叭。R20、R21、R22、R23、R24、R25 为均流电阻，分配给每只功率管均匀的基极偏流。

L1 为高频扼流圈，可防止超高频信号送往喇叭单元。C10、R34 为贝茹尔网络，可限制高频输出阻抗，令其保持在 10Ω 范围内。J1 为延时保护继电路，可防止喇叭受开机冲击，或发生故障时保护喇叭免遭损坏。

本功放的喇叭保护部分的原理比较简单，读者可自行分析。负反馈网络的选取视各人喜好而定。图 4-19 所示为几种常用负反馈网络电路，可参考图中任选一种。本机选择第 5 种方式。这种反馈方式为无源中点伺服，小环路反馈式。反馈信号由电压放大级经两只 $3k\Omega$ 电阻输出，由 $10k\Omega$ 、 $1k\Omega$ 电阻分压， $2.2\mu F$ 电容耦合至输入差分级的反相输入端形成负反馈环路。并联在 $10k\Omega$ 电阻上的 $15pF$ 电容为超前补偿电容，可防止高频相移引发的自激。由功放输出端馈入反相输入端的 $1M\Omega$ 电阻只起直流反馈作用，对中点电位进行伺服校正，使之始终稳定在 0V 左右。这种反馈方式的功放，能将喇叭

的反向电动势对功放输入级的影响而产生互调失真减至最低限度，放音时声音层次分明，清丽脱俗，不拖泥带水。

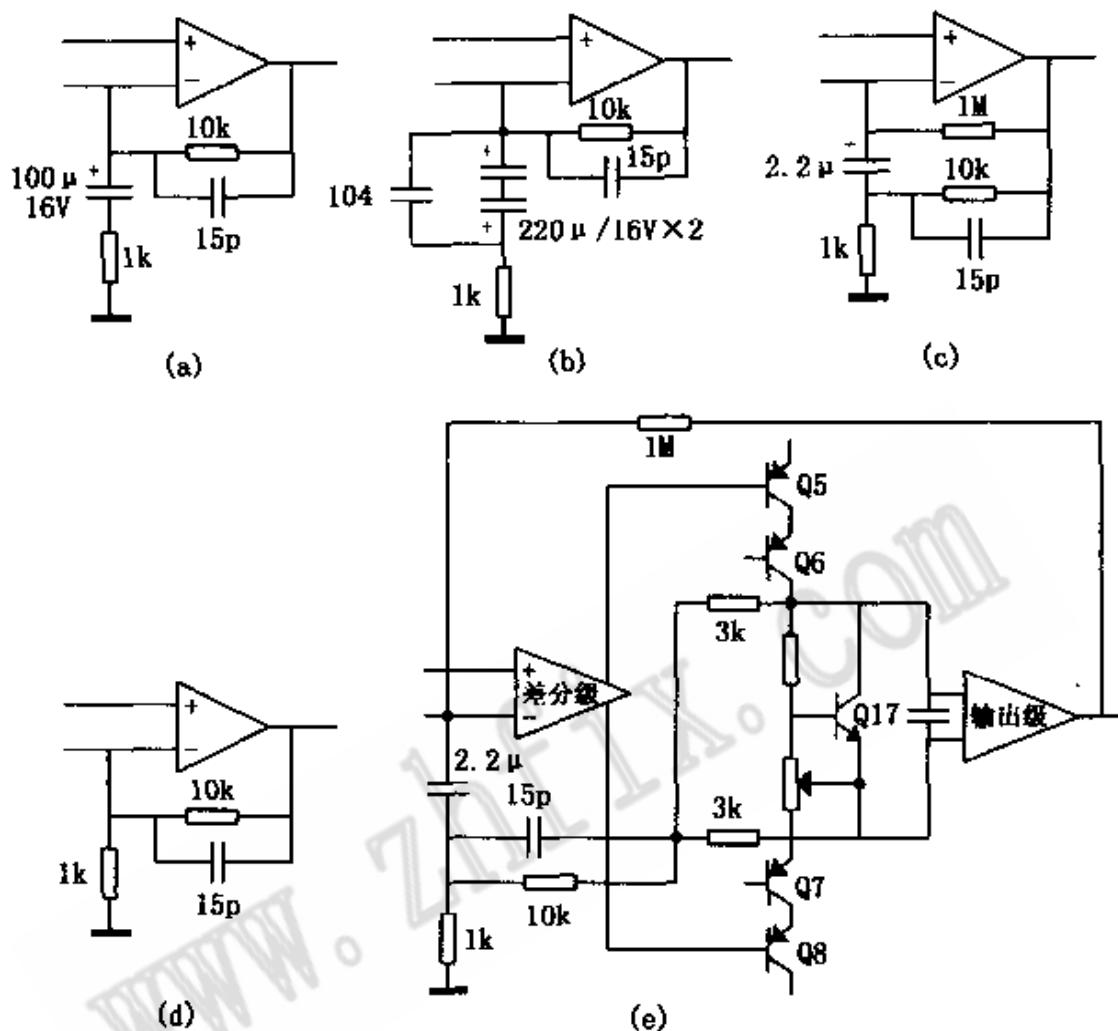


图 4-19 负反馈网络的五种电路形式

(二) 制作指导

图 4-20 所示为本功放印刷电路图。本功放对各部分元器件的质量要求较高。所有电阻除注明功率外，均为 $1/4\text{W}$ 进口五环金属膜电阻。 $\text{Q}1$ 、 $\text{Q}2$ 、 $\text{Q}3$ 、 $\text{Q}4$ 采用东芝孪生对管 K389、J109、C3381、A1349 尤佳，K389、J109 的直流参数为 $V_{\text{DS}}=50\text{V}$ ， $\text{IDS}=10\text{mA}$ ， $\text{PCM}=300\text{mW}$ ，跨导为 $8\sim22\text{ms}$ ，结电容为 10pF ；C3381、A1349 的参数为 $V_{\text{CEO}}=80\text{V}$ ， $I_{\text{C}}=100\text{mA}$ ， $\text{PCM}=400\text{mW}$ ， $f_T=170\text{MHz}$ ， $C_{\text{OB}}=2.6\sim3.6\text{pF}$ 。用小功率管 K246、J103、C2240、A970 等代换亦能正常工作，但放音效果稍逊。

--筹。

D1、D2 采用功率为 1/2W 的齐纳稳压二极管即可。担任电压放大的 Q5、Q6、Q7、Q8 管宜选截止频率在 140MHz 以上的中小功率对管，如 A1145、C2705、B716、D756、B647、D667、B649、D669 等。VR1、VR2、VR3 应选用高品质多圈精密可调电阻。Q9、Q10 用享誉发烧友中早有定论的 K213、J76、K214、J77、K219、J76。在这一级选用 MOS 管，可减轻电压放大级的负担，增强推动后级功率管的能力，突出场效应管酷似“胆石”的风味，这是本功放所刻意追求的特色。如果将 Q7、G10 的静态工作电流调至 100mA 以上，则胆味更浓。此时 R19 应换成 $12\Omega/2W$ 的电阻。若将 Q9、Q10 以 C2275、A985 之类的双极型中功率管来代替，上述特色将荡然无存，石机的缺憾暴露无遗，音色如何不言而喻。Q11~Q16 首选音柔和温暖的东芝大功率对管 C5200、A1943，要求其 $V_{CE} \geq 180V$, $I_C \geq 15A$, $PCM \geq 120W$, $f_T \geq 300MHz$ ，同类的如 C2921、A1215 等也可代用，其音质各有特色。

R26~R31 采用无感功率电阻。L1 为自制电感，用直径 1mm 漆包线在铅笔上绕 10 匝左右，顺反绕均可。保护部分的可控硅选 1A 的单向可控硅即可，继电器为 JQX-13F 型单双触点继电器，触点电流大于 10A。

(三) 安装调试

本机焊装完毕并检查确认无误后，即可按下列方法进行调试。

(1) 断开 R46 通往 A 点的一端，断开 2 只 6A 保险管。将 VR1、VR2 调至中间位置，VR3 调至阻值最大处。

(2) C7、C8 暂不接上，按图中提供的六种反馈网络任选一种接入电路（每种反馈网络有其不同的音色及韵味）。

(3) 由于场效应管具有负温度特性，因此需另加两块小散热器给 Q9、Q10，Q11~Q16 一起涂上导热硅脂紧贴在散热器上安装，并做好绝缘工作，有条件的读者不要限制散热器的总表面积和分量，必

要时可加风扇。

(4) 接通电源，检测 $\pm 50V$ 电压应正常，整流二极管及滤波电容 C19、C20 不应发热。同时 LED 闪烁，五秒钟后 LED 常亮，继电器吸合。将万用表置 1Ω 挡，用两表笔分别触地与 R46 断开端，继电器应能立即释放，LED 由常亮变为闪烁。将黑表笔触 Q18 的基级、红表笔触发射极，继电器也应释放，LED 应永久性闪烁，待切断电源重新通电五秒钟后，继电器复又吸合。即表明电源及喇叭保护部分基本正常。

(5) 断电接入两只 6A 保险管，恢复 R46 断开的一端，再次接通电源。此时功放部分各元件不应有明显发热现象。调节 VR1 使 R13 两端压降为 3V 左右，此时流经 Q1、Q2、Q3、Q4 的静态电流约为 2.4mA，流过 Q5、Q6、Q7、Q8 的静态工作电流约为 4.4mA。调节 VR3 使中点 A 对地电位为 $0V \pm 10mV$ 以内。调节 VR2 使 R26~R31 任一级电阻两端压降均为 200mV，即流过每个功率管的静态电流为 400mA。此时 B、C 两点对地电位约为 $\pm 2.4V$ 左右。R34 不应发热冒烟，否则说明电路有自激。若有自激，接上 C7、C8 即可消除。以上步骤完成后，LED 即由闪烁变为常亮，同时继电器应能正常吸合。

(6) 静候 10 分钟，散热器由冷逐渐变热，然后稳定在 80°C 以下，再测功率管静态电流，会发现有所下降，说明 Q17 已起温度补偿作用。适当调整 Q17 与散热器之间的距离，使功率管的静态电流维持在 400mA 左右，直至稳定。

(7) 半小时后重复上述 6 项调试过程，尤其要注意检测功率管的静态电流，不应有逐渐上升的趋势，散热器也不能越来越热。

八、威廉逊 40W+40W 再生功率放大器

(一) 电路特点

图 4-21 为威廉逊 40W+40W 再生功率放大器的电路原理图。

输入端采用了具有高 β 值、 $V_{CEO} \geq 60V$ 的 PNP 晶体管，还加入了一个较为简单的谐波低通滤波器，阻止信号源中的超声波信号的干扰。要求信号源的输出阻抗小于 $5k\Omega$ 。电路中 BG3 担任主电压增益放大，采用了静态恒流源作为负载，使输出级得到最低的非线性转移特性。恒流源 BG2 的偏置电压是由 D1 和 D2 的反向偏置的恒定电压提供，输出级是一对全对称共集电极电路的形式，其 bc 结输入偏置电压是由三只反向偏置的硅二极管 D3~D5 及一只 50Ω 半可变电阻 VR1 组成，作为前级推动级的负载之一。在有示波器的情况下，调节 VR1 至示波器上的交叉失真刚刚消失时为止。在正常情况下，放大器的单路声道的静态电流约为 $50mA$ 。如果采用示波器调整电路时，可用 7.5Ω 负载， $1W$ 的输出功率，在 $1kHz$ 输入信号的频率下进行调整。

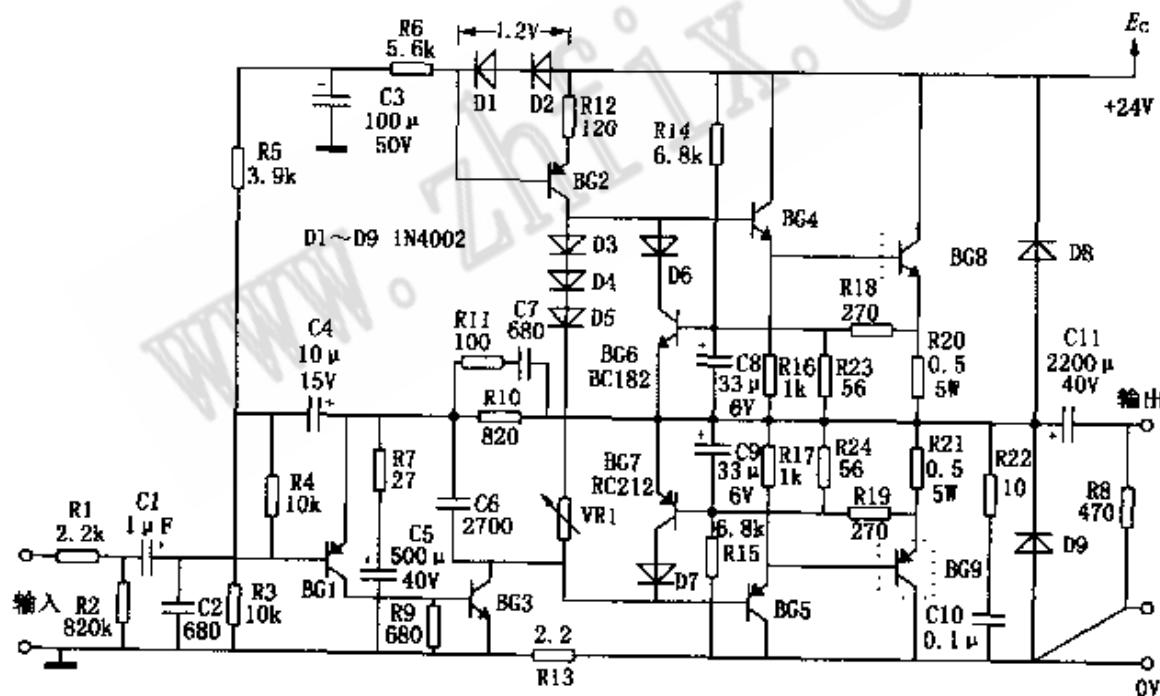


图 4-21 威廉逊 40W+40W 再生功率放大器电路图

(二) 制作指导

图 4-22 威廉逊 40W+40W 再生功率放大器印刷电路图。在制作此功率放大器时，末级输出放大器应有足够大的散热片。同时要

严格遵守接地的位置，在电路板上已提供了独立的输出接地回路，不可在其他地方再接地，以免产生信号的干扰，其他部分的接地点和每部分的 0V 引线，必须两点连接在一起。其中一点为供电电路 C1 的 -V 接点（同时要使用较粗的电源线，包括各部分的电源引线，其线径要大于 20mm），另一接地点在输入端，此接地点需与机壳相连接，即使这样，两个声道间仍然有一个接地环路。解决的方法是在推动级与输出级之间的零电压线的中间接一只 2.2Ω 电阻 R_a 。如果功率放大器工作时，此电阻发热，就说明接地点有错。

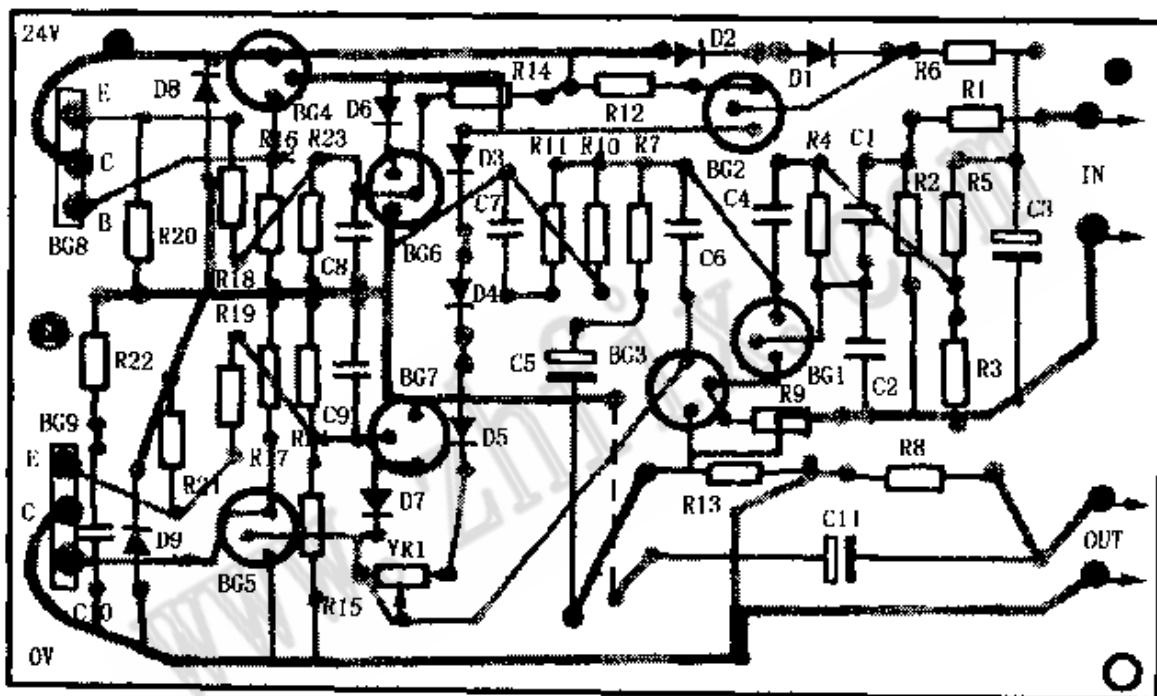


图 4-22 威廉逊 10W+10W 再生功率放大器印刷电路图

另外，晶体三极管 BG8 和 BG9 是安装在电路板外的，如果采用 TIP35/36 之类的塑封晶体三极管，可直接焊接在线路板上，再加上铝质散热片即可。

电路图中没有给出晶体管的具体型号，制作者也可根据自己对功率放大器的要求，选择管子。

九、动态偏压伺服功率放大器

(一) 电路特点

为解决甲类功放静态功耗大，大功率输出时仍有交越失真等问题，本功放设计采用了末级偏压伺服电路。如果电源有足够的容量，功率管有足够的输出能力，本功放即使在满负荷输出情况下，负载接近短路时依然不会出现开关失真现象，当然也就没有交越失真，这是任何甲类功放所不能顾及的。故本功放音质相当优美，足以与甲类功放相提并论，而其电源利用率却与乙类功放相当。由于本偏压伺服电路设计独特，故无需对电路进行预调，即可使本级管工作于无交越失真状态。

图 4-23 为动态偏压伺服功率放大器的电路原理图（由于两声道完全相同，仅画出一个声道）。VT13、VT14、R30、R33 及 RP 组成达林顿输出级的偏压控制电路，而 VT17、VT18、R30~R33、IC_a、IC_b、R36、R37 及 R41、R42 及电子滤波器构成了动态偏压伺服电路。静态时，VT17、VT18 的基极电位为 0V，受 VT13、VT14 的发射极及 R31、R32 控制 VT17、VT18 处于微导通状态，流入 R30、R33 的电流基本上不被 R31 及 R32 分流。由于 R44、R45 两端的电压在静态时近似为 0V，故 IC_a、IC_b 静态时的输出端电位也近似等于终点电位。本电路的终点零位漂移电压在 8Ω 负载下为 100mV 时，折合到 R44 及 IC_a 输出端的漂移电压仅为 -2mV。由于 VT17 静态时处于微导通状态，故对如此小的漂移电压并不敏感，当功放输出端出现幅值较大或者很大的零位漂移电压时，本功放将遵循偏压伺服电路动态时的工作过程，即无论正向漂移电压有多大，达林顿管 VT24~VT26 仍将保持原静态电流值，换言之，达林顿管 VT24~VT26 并没有因为正向零漂而增加管耗，而 VT21~VT23 因正向零漂导致管耗的增大与乙类功放相当。

由此可见，接入偏压伺服电路后，不会因零漂电压对本功放产

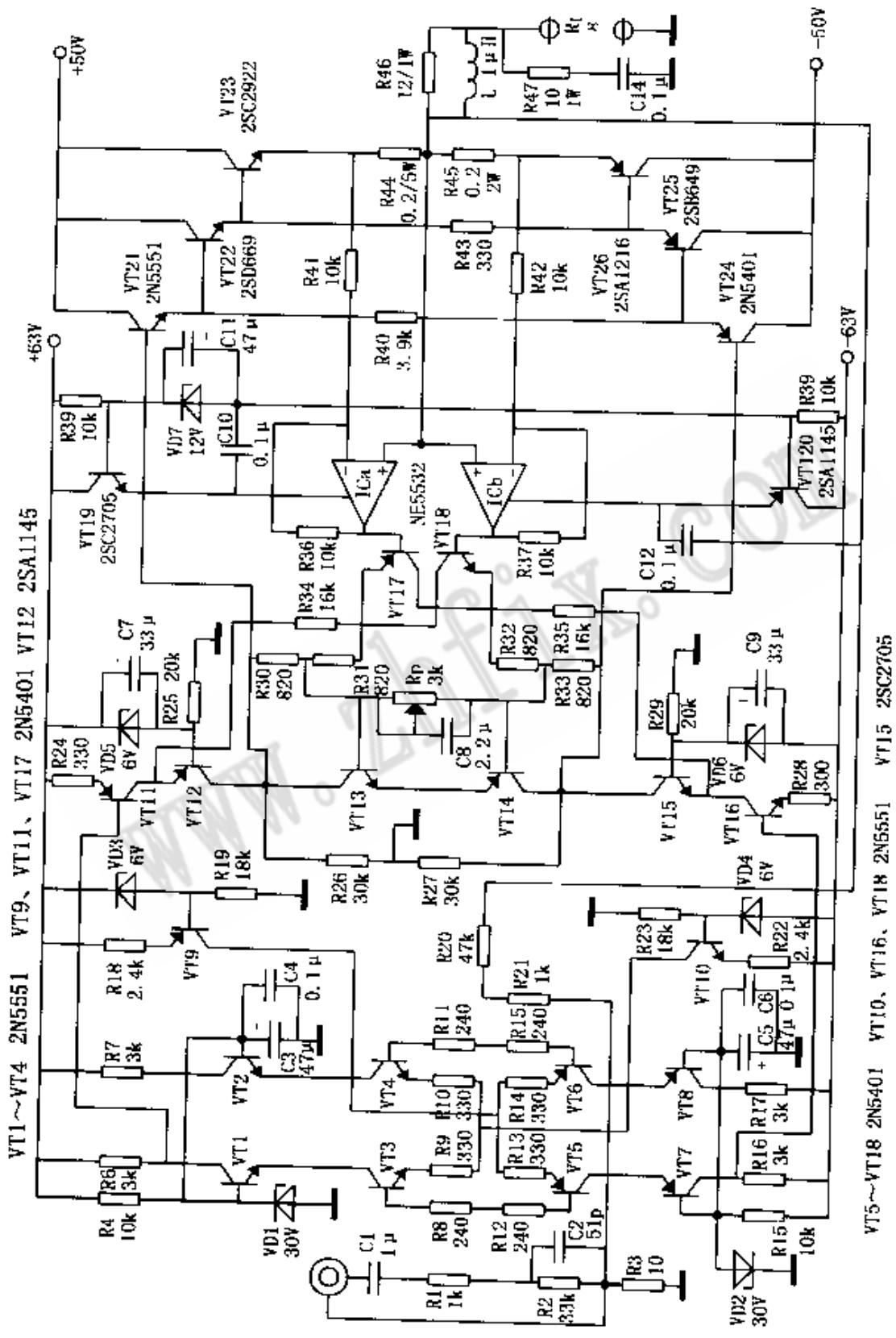


图 4-23 动态偏压伺服功率放大器的电路图

生新的有别于经典式功放的不良影响。零位负漂时过程与上述相同，相位相反。当环境温度变化时，VT13、VT14 与 VT17、VT18 有同样数量的发射结，故其负温度系数相等，因此，偏压伺服电路的接入，不会影响 VT23、VT26 静态偏流的稳定性。由于本电路加入了 VT14，故比经典式功放对达林顿电路的静态偏压控制能力提高了 1 倍。另外，由于 VT17、VT18 静态时仅处于微导通状态，故基本上不会因末级管 VT23、VT26 大动态输出时管温上升，导致 R44、R45 两端直流电位增大而使 R30、R33 两端电压增大，即此时达林顿管的静态偏压仍然是稳定的，加之本功放静态电流的取值仅为 5~10mA。因此，末级功率管散热器的设计，只需按照乙类功放的标准即可。如果有必要，可将 VT13、VT14 贴于功放末级管的散热器上，以提高热稳定性，抑制本级管静态电流的增加。

根据电路分析，动态时，信号的正（负）半周信号，R30（R33）两端的电压是跟随 R44（R45）两端电压的变化而等幅变化，而 R33（R30）两端电压恒定不变，这是接入偏压伺服电路，使 VT23 或 VT26 无论在信号的正或负半周工作时，另一管均不会截止的缘故，也是本电路超出甲类及乙类功放的优点。

本偏压伺服电路中的运算放大器工作于甲类状态，三极管 VT17、VT18 工作于微导通或导通状态，故动态情况下，其本身不会产生交越失真。

VT17、VT18 的集电极通过电阻 R34、R35 串接于 VT11、VT16 的集电极，避免了 VT17、VT18 对激励级电流的分流，使本功放的激励级仍以电压驱动达林顿管的输入级，达到了控制激励级开环增益。另外，动态时由于运算器输出端能提供瞬时几十毫安的电流，对 VT17(VT28)b、c 结电容的充电速度极快，因此不会延缓流入 VT16 (VT11) 集电极电流的速度。本偏压伺服电路，对扬声器产生的反电动势电压有极强的抑制能力，因而能有效地抑制由此而引起的交界面互调失真。

(二) 制作指导

本功放采取全对称设计，以改善电路的开环失真指标，在两级电压放大电路中均接入了共基-共射级联电路，以改善各级电压输出波形、提高频响、减小失真。

本功放第一级增益约 13dB，第二级增益约 40dB，总开环增益约 53dB，闭环增益约 33.5dB，总负反馈量约 19.5dB。

图 4-24 为此功率放大器的印刷电路图。

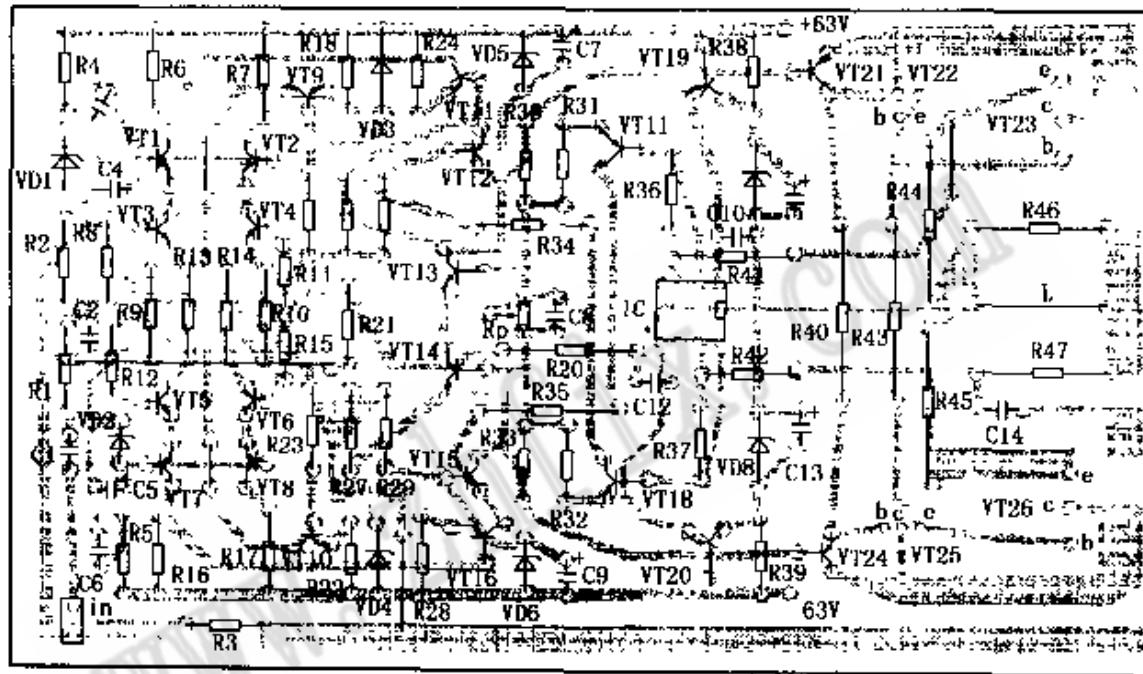


图 4-24 动态偏压伺服功率放大器的印刷电路图

由于本机设计为直流放大器，因此 VT3~VT6 的放大倍数必须互为配对，其配对误差 $\leq 3\%$ ，且要求 V_{BE} 一致性好，VD3、VD4 互差 $\leq 3\%$ ，其余三极管放大倍数的配对误差 $\leq 5\%$ 。VT13、VT14、VT17、VT18 的 V_{BE} 一致性要好。C8、C10、C11 选取钽电容，C1 可选用橙色方形的 MKT 电容或 CBB 电容，如果没有亦可用 2 只 2.2μF 的钽电容串联使用，因为它处于放大器的前端，对重放音质影响较大。所有稳压管均取 0.5W。电阻除标明功率外，均用 5 色环 0.25W 的金属膜电阻。

确认所有元器件安装无误后方可通电调试，接通电源前将 RP 调在阻值的 2/3 位置。接通电源后，第一步，检测终点零位漂移电压，如果 4 只差分管及 2 只二极管 VD3、VD4 符合上述配对要求，零位漂移电压不会超出±50mV 范围，否则可微调 R18、R22 电阻，直至符合要求。第二步，调整 RP 使本级管电流为 5~10mA，以免增加不必要的静态功耗，因为本机设有偏压伺服电路，所以 10mA 的静态电流已足够使用。

实测本功放，在 8Ω 负载时输入适量幅值信号，在频率为 1Hz~1MHz 正弦波信号范围内（所用信号源频宽 1Hz~1MHz）示波器显示无任何交越失真，本机即告制作完成。

十、双单声道 60W×2 场效应管功率放大器

（一）电路特点

本功放采用双单声道结构和准 DC 电路，性能良好，结构紧凑，十分适合业余爱好者仿制。图 4-25 为一个声道功放部分的电路原理图，为了减小失真，尤其是偶次谐波失真，电路采用了全对称全互补结构。

输入级采用互补差分电路，使用分立型器件，只要花些时间认真选配，能获得很好的性能。各管射极加有本级电流负反馈电阻 R11、R12、R15、R16，既有利于改善非线性失真，又有利于改善瞬态互调失真。R3、C3 和 R4、C4 限止差分级带宽，在一定程度上也决定了整个功放开环带宽，按本功放设计，开环带宽约为 6.5kHz。该级每管静态电流取为 1mA，分别由 T5、T6 恒流源提供。恒流源则由发光二极管 D1、D2 提供基准偏置，这能大大提高恒流源的温度稳定性，因为 LED 和晶体管的温度系数基本上是一致的，可以获得很好补偿。

输入耦合电容 C1 之后的 R1、C2 构成低通滤波器，限止进入本功放的信号带宽及防止超音频干扰信号。R2 为 T1、T3 基极偏置电

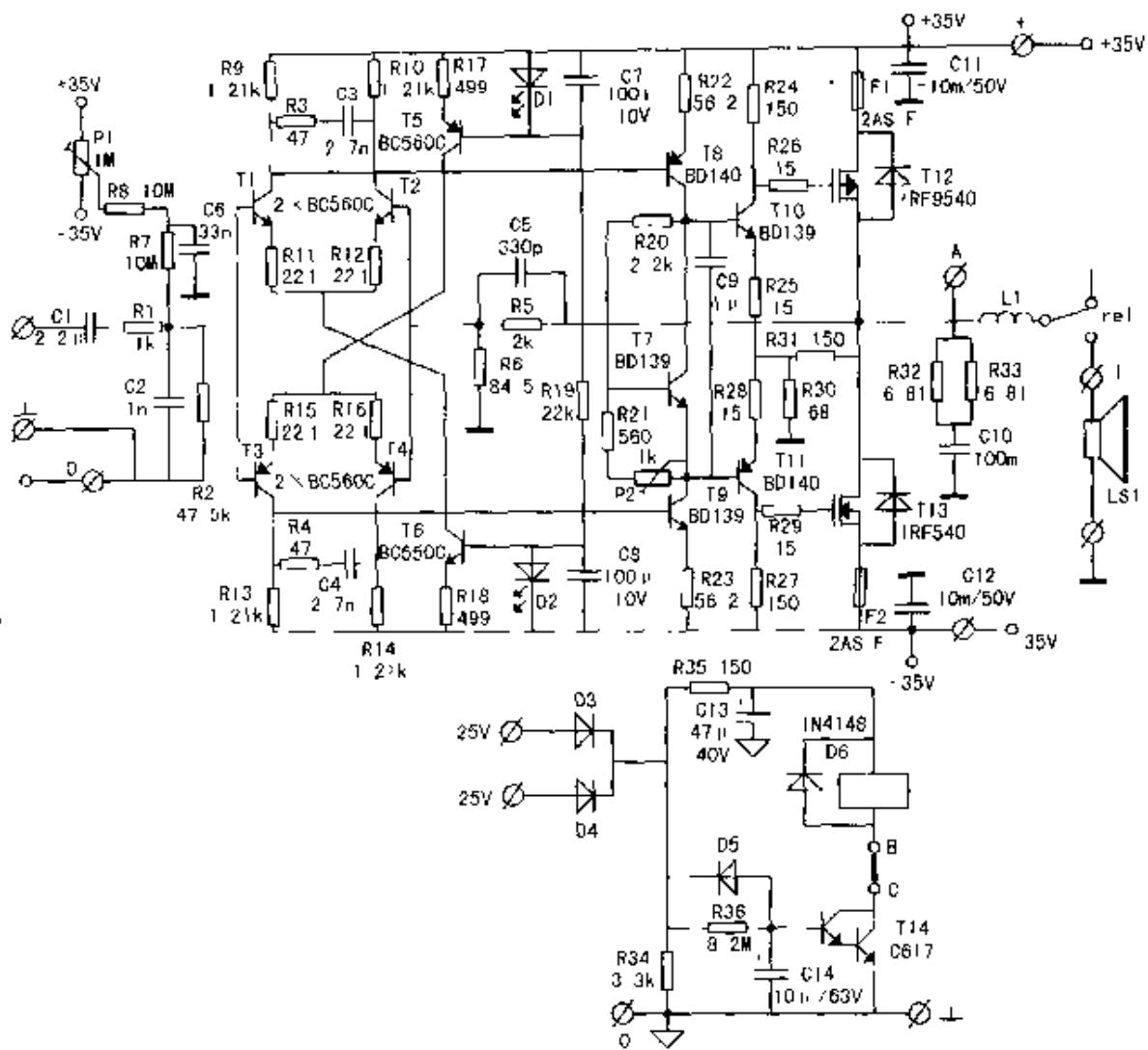


图 1.25 双单声道 60W×2 场效应管功率放大器电路图

阻，决定本功放输入阻抗。P1、R7 和 R8 用作末级中点零位调节。T1、T3 集电极信号直接耦合到 T8、T9 组成的第二级电压放大器，它们的射极也接有电流负反馈电阻，集电极间接有 T7 构成的 V_{RF} 倍增器，调节 P2 可改变本级大功率管的静态电流。

T10~T13 组成本功放的倒置式互补输出级。由于 T12 是 P 沟道场效应管，T13 是 N 沟道场效应管，这种安排使该级除了具有电流放大作用外还具有电压放大作用。这种输出级也可加入本级负反馈，以降低失真。本级负反馈电阻由 R30、R31 组成，按整机设计要求，本级电压增益取 3 倍。整机总负反馈由 R5、R6、C5 组成，闭

环增益约 27dB。

由于场效应管的漏极电流与温度之间具有正温度系数关系，温度升高将使漏源电阻升高，从而导致流过器件的电流自动减小。这种特性再加上串在场效应管供电线上的保险丝构成的简单短路保护作用，基本上无须另加其他保护电路即能使本功放较可靠地工作。

功放输出端设有延时开机电路，它的供电取自主电源，这样工作比较一致，当 C14 的电压经 R36 充到 1.2V 以上后 T14 导通，继电器吸合接通扬声器。

(二) 元器件选择

电路图中电阻均用金属膜电阻。R30、R31 用 5W 的，R32、R33 用 0.5W 的，其余均用 1/4W 的。另外，R1、R3、R4、R7、R8、R19～R21、R26、R29、R34～R36 的阻值误差允许为 5%，其余均用 1%。

C1 用耐压 50V 的 MKT 电容，C5 用聚苯乙烯电容。除电解电容器外，其余可用涤纶电容。

D1、D2 采用红色发光二极管，3mA 时压降约 1.6V。

BC550C/560C 是通用低噪声管，它的主要规格 $I_{cm}=0.2A$, $P_{cm}=0.5W$, $BV_{ceo}=50V$, $f_T=300MHz$, $h_{FE}\geqslant 240$ 。如果一时选购不到，可用相应规格的其他管代用。输入级的两对管子应在 1mA 下按 h_{FE} 配对，误差尽量小些。

BD139/140 的主要参数 $I_{cm}=0.5A$, $P_{cm}=6.5W$, $BV_{ceo}=80V$, $f_T=75MHz$, $h_{FE}\geqslant 100$ ，同样也可用相应其他管型代用。

IRF540/9540 为 IR 公司的 HEXFET 功率场效应管，主要性能 $I_D=27A$, $V_{DS}=100V$, $P_D=125W$ 。

BC617 为中功率达林顿管，可用一小功率管与 1W 以上的中功率管复合组成。

L1 用 $\phi 1.5mm$ 漆包线在内径 $\phi 6mm$ 骨架上绕 6 匝后脱胎而成。继电器可用 24V，触点电流 2A 以上的。每一声道的散热器的体积不小于 $40mm \times 60mm \times 140mm$ ，如果机壳较大，尽可能选用大一些的。

主电源整流可用 100V/5A 桥堆，也可用 4 只 1N5404 整流二极管代替。

(三) 制作指导

安装工艺对整机性能具有举足轻重的影响，整机元器件在机壳内的布置是一种双声道结构方式。每个声道电源部分和功放部分分别装于两块印刷板上，功放印刷板及元器件布置见图 4-26 所示。

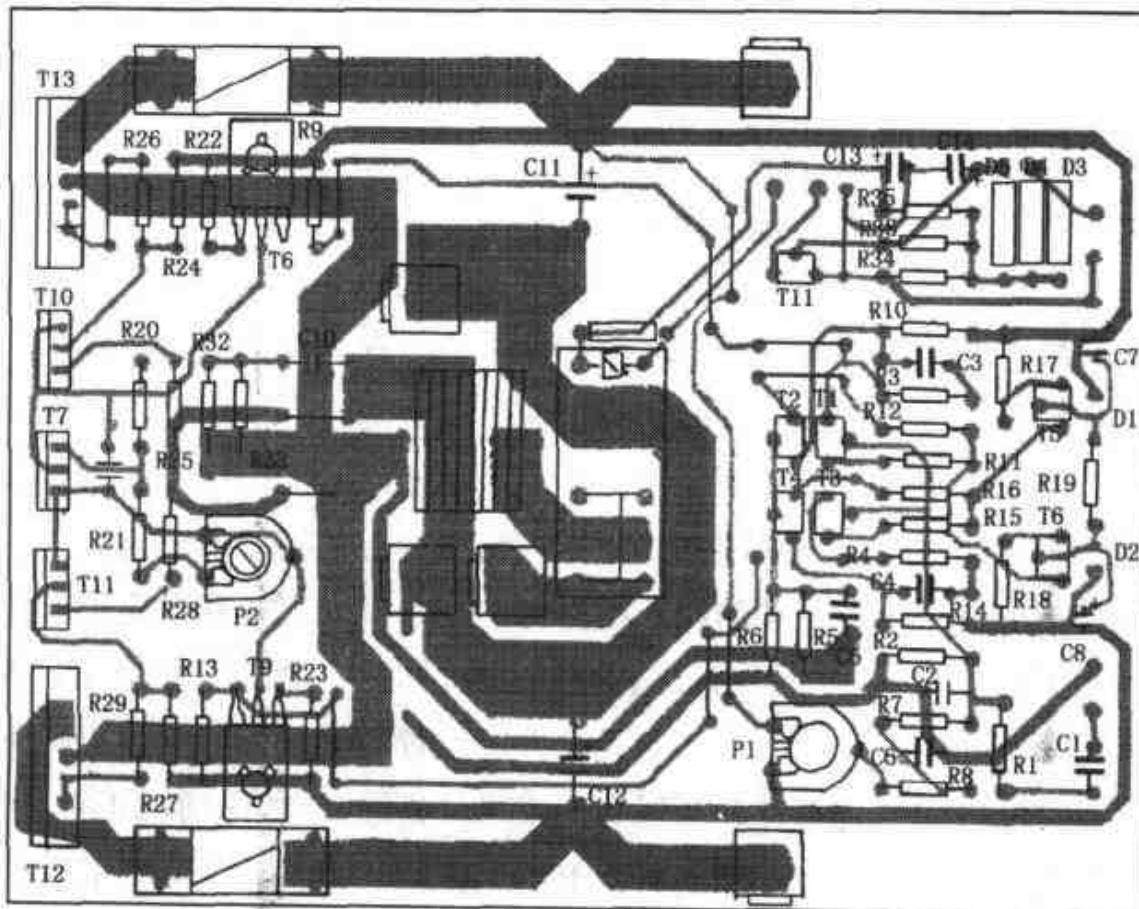


图 4-26 双声道 60W×2 场效应管功放印刷电路图

按图制作印刷板前应先购齐全部元器件，因代用元器件的大小或管脚排列不同等原因，会使元器件布置在相应部位显得过密不均，因此应按实际使用器件对印刷板布线作适当修改。

印刷板上有不少是用导线跨接相连的，应先焊好这些跨接线后再安装其他元器件。

T1 与 T2、T3 与 T4 应相互贴紧安装，然后自制一钢片把它们相互夹紧，以确保两对差分管具有“等温”特性，从而使之特性更为一致。同理，D1 与 T5、D2 与 T6 也应贴近安装，但外部不一定要用钢片夹紧。

T7、T10~T13 在印刷板上安装时，尽量使各管散热面处于同一平面上，然后各管再固定到同一散热片上，各管与散热片间应垫云母或聚酯垫片作电气绝缘，安装后应用万用表阻挡量一下已绝缘。如果无问题，就把散热片固定到后面机壳上，把印刷板固定到底板上。

整机调试先从电源部分开始。把±35V 直流输出与功放板暂时断开，接通电源开关后检查±35V 电压有无异常。这部分电路一般不会出问题，但在调试功放之前还是单独检查为妥。

接下来是在不接负载的情况下调试功放输出端中点电位和末级静态电流。先把 P1 动臂置于中心位置，再把 P2 动臂调至 T7 发射极端，即使 P2 呈现最大阻值位置。功放输出端对地接万用表直流电压 10V 挡，接通电源开关约经几秒后电源指示发光二极管点亮，万用表指示值应为 0.5V，否则可微调一下 P1，同时用手触摸散热片上各管管壳应不烫手，功放板上各元器件应无冒烟等异常情况。否则应立即关断电源检查器件和接线有无错误并排除之。如果情况正常，可把万用表改到直流 1V 挡，调整 P1 使输出中点直流电位尽量接近零伏。

然后断开电源，把万用表置于直流 1A 挡，并接入正电源供电线路中，以测整机静态电流。首先应注意，勿用万用表替代保险丝 F1 串在 T12 的漏极电路中，以免影响该管工作点。再次接通电源，此时静态电流一般不会很大 (<100mA)。经 5~10 分钟后调节 P2 使万用表指示电流为 300mA 左右。此电流会随时间而逐渐下降，约过半小时预热后调节 P2 使此电流为 230mA，这样流经 T12、T13 的静态电流大致调在本设计所要求的 200mA 静态电流值上了。

这里着重指出，功率场效应管的静态电流值一般取得比双极型功率管的大（一般在 100mA 以上），另外，场效应管电流具有负温度系数特性。如果一开始就把静态电流调到预定值上，正常工作后静态电流就会偏低，从而使放音失真增大，故调试中应有一段预热时间。

静态电流调好后复测一下中点电位，必要时用 P1 微调。最后，接上负载电阻（8Ω）再复测一下中点电位和静态电流，并作相应微调一下。另一声道调试完全相同。

十一、VAA-70 功率放大器

国内胆机生产厂家“大极典”电子公司的音响设计师曾德钧先生曾经设计过一款电路简洁、装配调试比较容易，且功率大小适中，整机造价不高的电子管功率放大器“VAA-70”，在音响发烧友中引起很大反响，这里将曾德钧先生对本机的设计思路介绍给功放 DIY 者，供制作参考。

（一）电路特点

整机电路如图 4-27 所示。每声道由三只电子管组成，其中一只三极-五极复合管用作电压放大和推动，两只末级功率放大管。表 4-6 为几种常见音频用三极-五极复合管的特性，供制作者在制作时根据手头的材料进行选用。末级功率管选用 6L6GC、EL34、KT88、6550 等著名管。6L6GC 在音色上稳重朴实，但功率较小；EL34 音色清艳晶莹；KT88 及 6550 音色浑厚、辉煌，但成本较高。

本机电路采用的 6F2 管的五极管部分用作电压放大，三极管部分接成 P-K 分割用作倒相兼推动；末级管采用的 EL34 为超线性接法，工作在 AB 类状态。电路中电阻 R18 为环路反馈电路，其反馈量不大（约 10dB），对提高整机稳定性、一致性和信噪比有一定的益处。

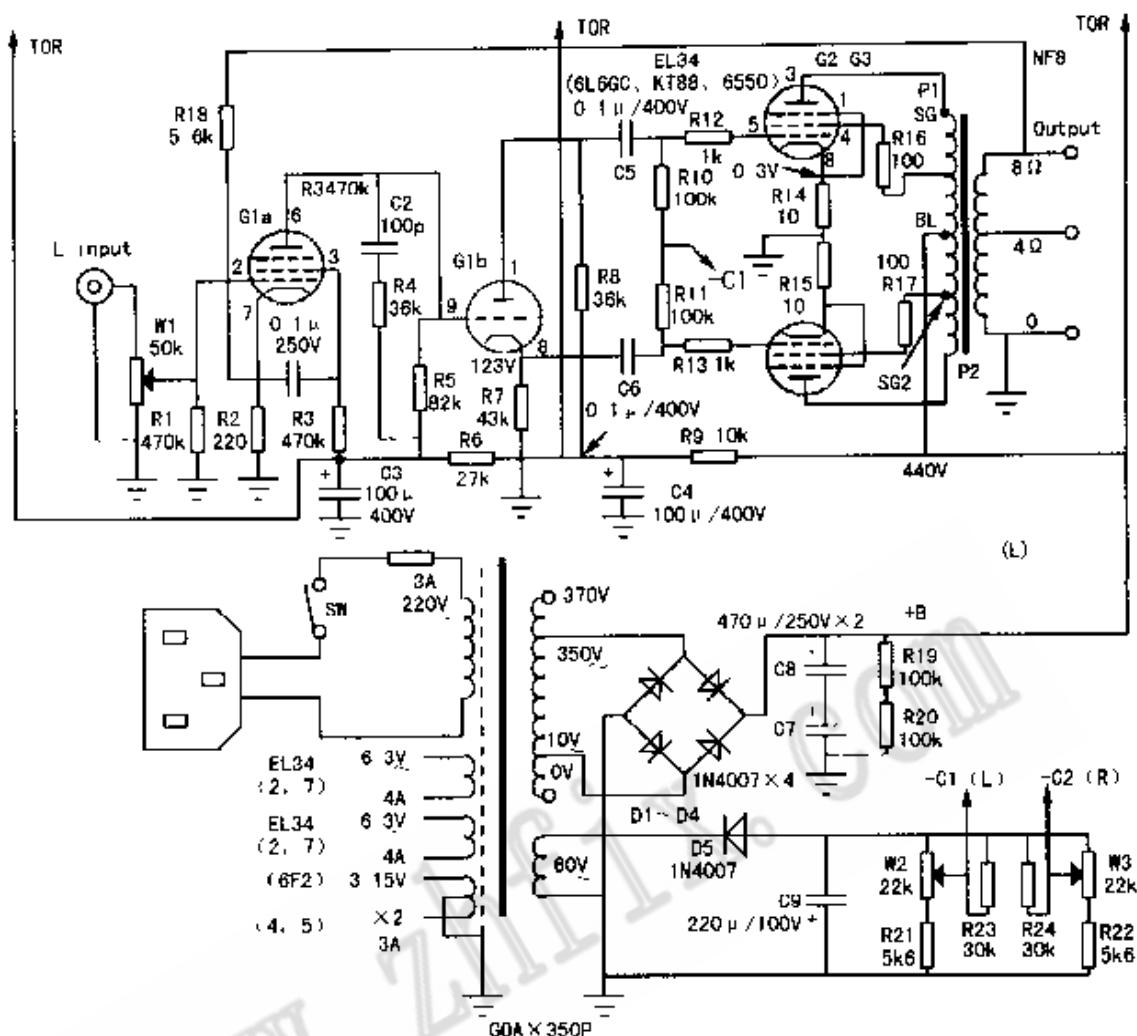


图 4-27 VAA-70 功率放大器整机电路图

表 4-6 几种常见音频用三一五极复合管特性

参数		型号	6AN8	6GH8	7199	6F2	8BL8
三极管部分特性	屏极电压 (V)	200	125	215	150	100	
	栅极负压 (V)	-6	-1	-8.5	-	-2	
	放大倍数	19	46	17	40	20	
	跨导 (mA/V)	3.3	8.5	2.1	8.5	5.0	
	屏极电流 (A)	13	13.5	9	8	14	
	内阻 (Ω)	5750	5400	8100	5000		
五极管部分特性	屏极电压 (V)	200	125	220	250	170	
	帘栅极电压 (V)	150	125	130	110	170	
	屏极电流 (A)	9.5	12	12.5	10	10	
	帘栅极电流 (A)	2.8	4	3.5	5.5	2.8	
	阴极自给偏压电阻 (Ω)	180	-	62	68		
	栅极负压 (V)	-	-1	-	-	-2	
	跨导 (mA/V)	6.2	7.5	7.5	5.2	6.2	
	内阻 (Ω)	0.3	0.2	0.4	0.4	0.4	

(二) 制作指导

本机的放大电路部分除末级和输出变压器以外，均安装在一块印刷电路板上，如图 4-28 所示。这样便于安装和调试。电源电路的设计考虑到升级等方面的需求，其电路可简可繁，即可用不同规格的元件组成不同的整流和滤波电路，这样为制作者提供了升级的便利。

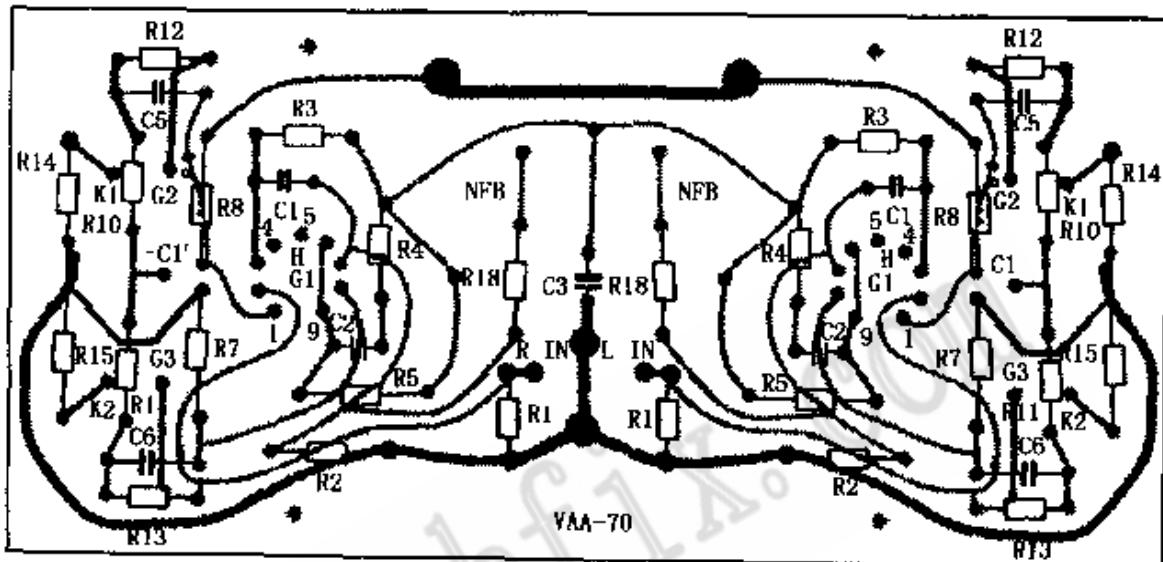


图 4-28 VAA-70 功放放大电路印刷电路图

本机的电源变压器和输出变压器也是采用灵活的设计原则。电源变压器的灯丝绕组有 3 组，2 组 6.3V/4A，并有 5V 抽头专供末级功率放大管灯丝之用；6.3V 供 6L6GC、EL34、KT88、6550 等管用；5V 供 2A3、300B 等管用；1 组 3.15V×2 供次级推动管用。高压绕组有 340V、360V、370V 等交流高压输出，70V 绕组提供给末极栅负压。

输出变压器的阻抗设计可以 KT88、6550 为主，兼顾 EL34、6L6GC、300B 及 2A3，负载阻抗为 $5.5\text{k}\Omega$ 。该输出变压器可为线包结构，采用分层分段平衡绕制，硅钢片最好采用进口冷轧高硅片，当然也可采用市售的输出变压器，只要电压等级达到以上的要求即可。

本机的电源电路印刷电路板如图 4-29 所示，制作者只需根据图中所示容量选择元器件。

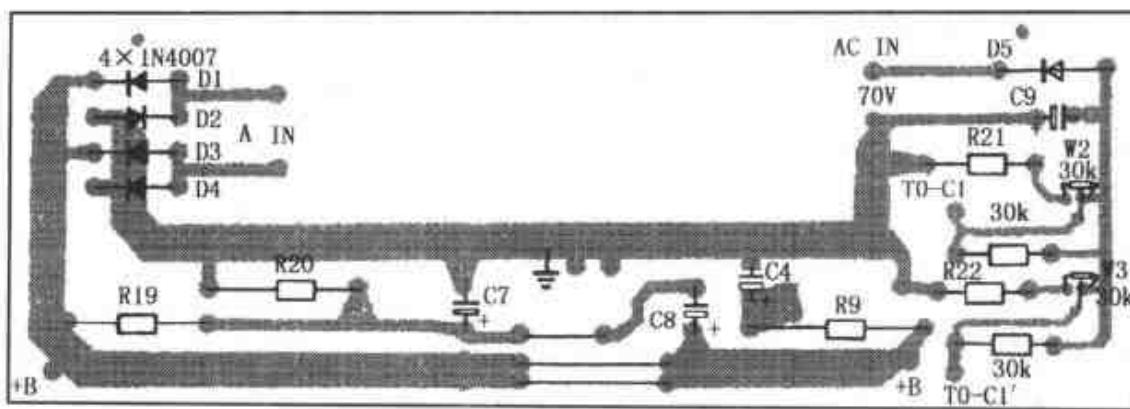


图 4-29 VAA-70 功放电源电路印刷电路图

本机的装配图如图 4-30 所示。在选用元器件时，最好选用正品质量较好的元件，这样才能保证制作完成后的整机性能。电阻可采用精度为 1% 的金属膜电阻，耦合电容采用无感聚丙烯电容，电子管最好是经过老化配对，配线采用 OFC 线，输出变压器最好采用正品，如“金牛”牌。

十二、电子分频高保真功率放大器

(一) 电路特点

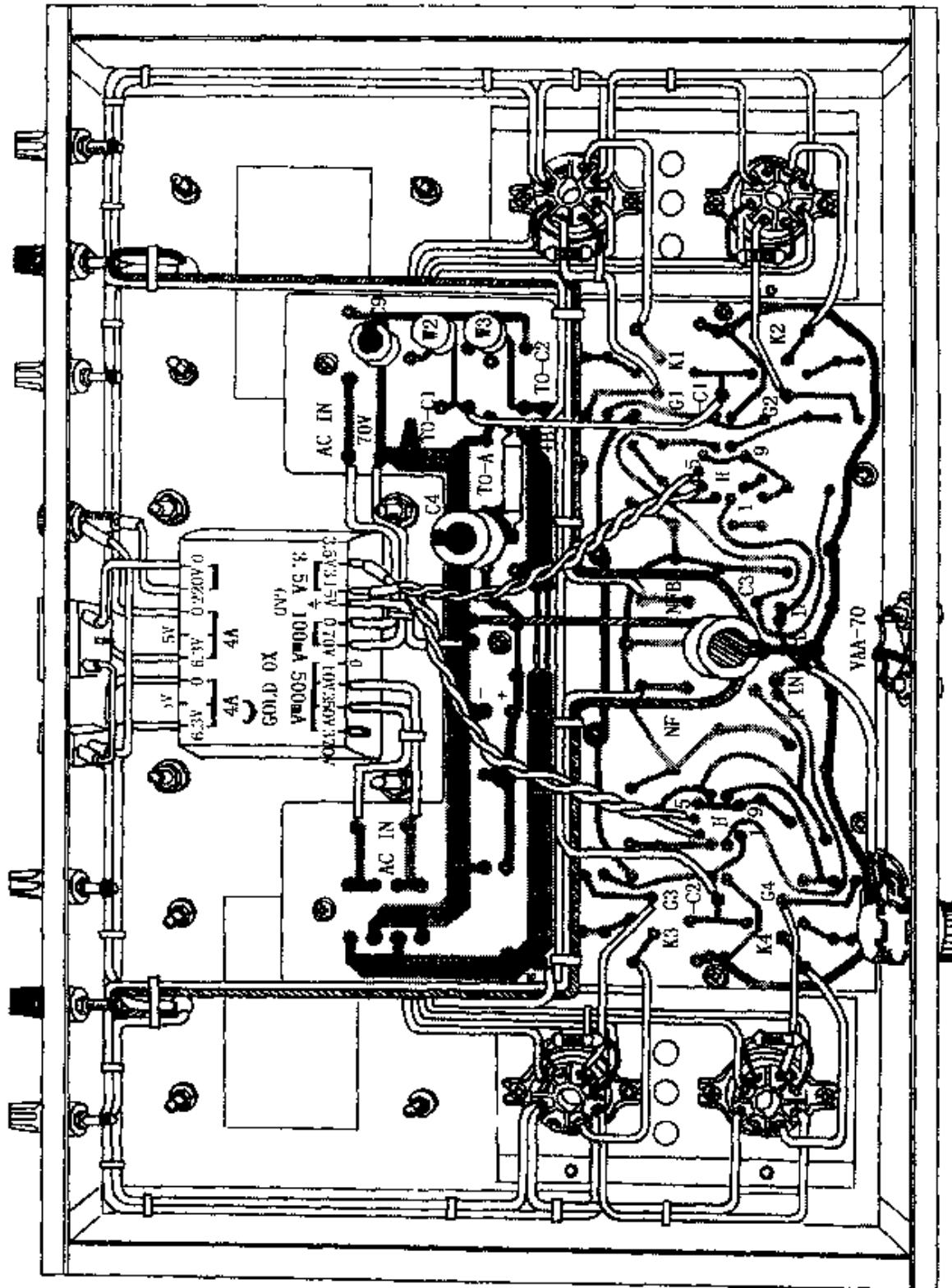
本机简洁明了，制作容易，调试简单，采用前级分频，让高低音分别进行放大，并去除一些不必要的功能（包括音调部分），这样重放音乐的层次感更好。

本机信号输入转换电路原理如图 4-31 所示。它由集成电路 IC1、IC2 和四个继电器组成，当轻触开关 K1~K4 中的任何一个开关按下时，IC2 与之连接的管脚呈高电位，相应的输出脚也呈高电平输出，而 IC1 的输出脚则输出低电位，使对应的继电器吸合，指示灯点亮，所选取的输入端设备接通。

输入转换使用继电器，其优点是很明显的，它比机械转换开关更耐磨损，声道隔离度更高，也比专用转换集成电路对输入信号的损耗小，附加失真小，声音听起来更自然。

前级放大电路采用对称互补推挽放大，由 Q101~Q104 组成双差分放大电路，后级输出采用场效应管 2SK214 和 2SJ77，使得输出

图 4—30 VAA—70 功放整机装配图



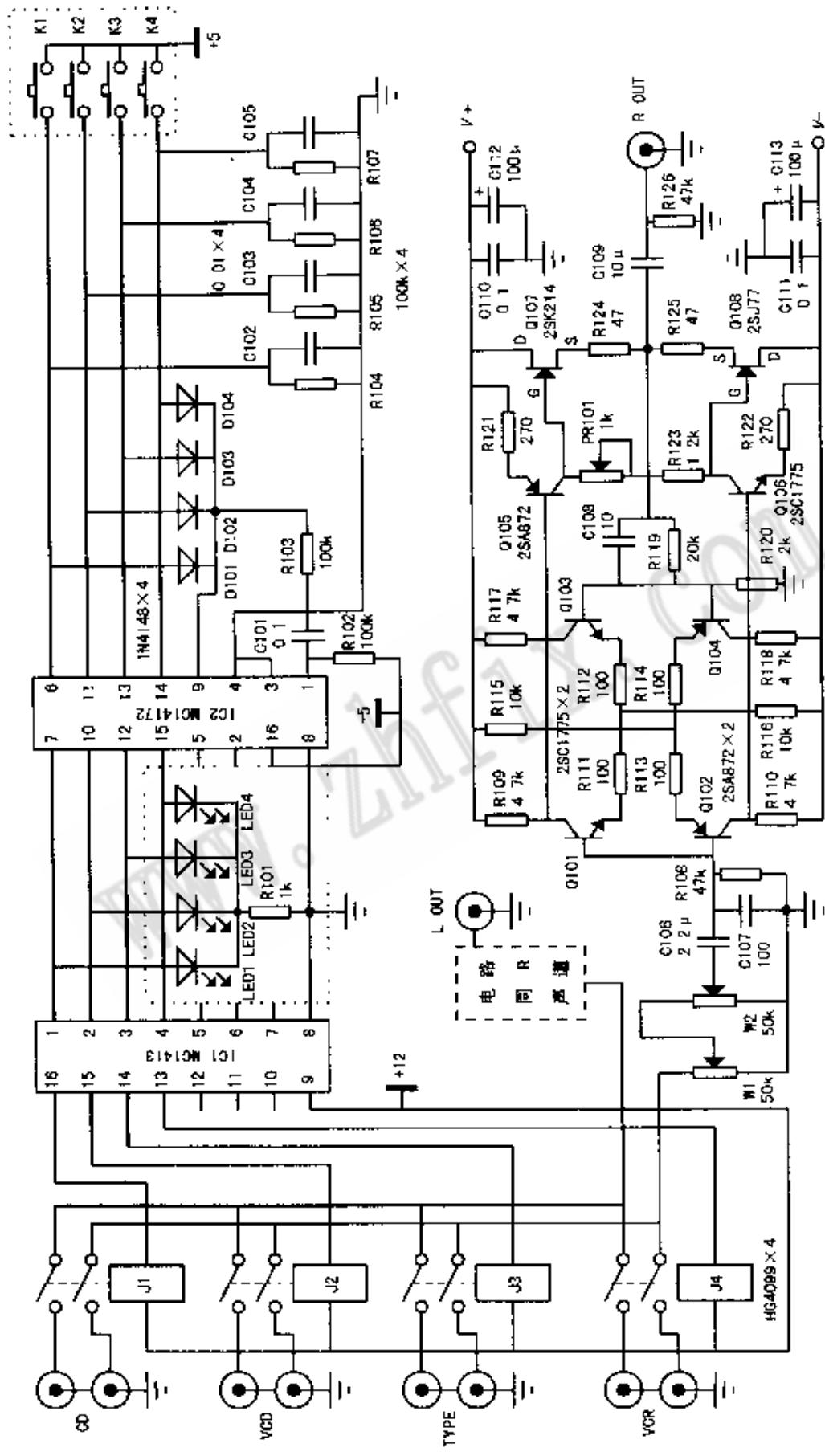


图 4—31 电子分频高保真功放输入转换电路

动态范围更大，驱动能力更强。

后级放大电路原理如图 4-32 所示。由 C201、R201、R202、R212、C206 构成无源二分频电路，分频后的中高音部分送入 Q201~Q206 组成的电流反馈型功率放大器，其输入缓冲放大器为输出阻抗低、解析度高的达林顿推挽射极跟随器，电路异常简单，但其对音乐的表现却不俗。

分频后的中低音部分被送入全对称互补式推挽放大电路，进行对中低音的放大。其特点是在负反馈电路中增加了低频补偿电路，用来改善低音效果。如果追求大功率，可以在输出级并接上两对或三对功率管。

扬声器保护电路及电源电路原理如图 4-33 所示。此类保护电路

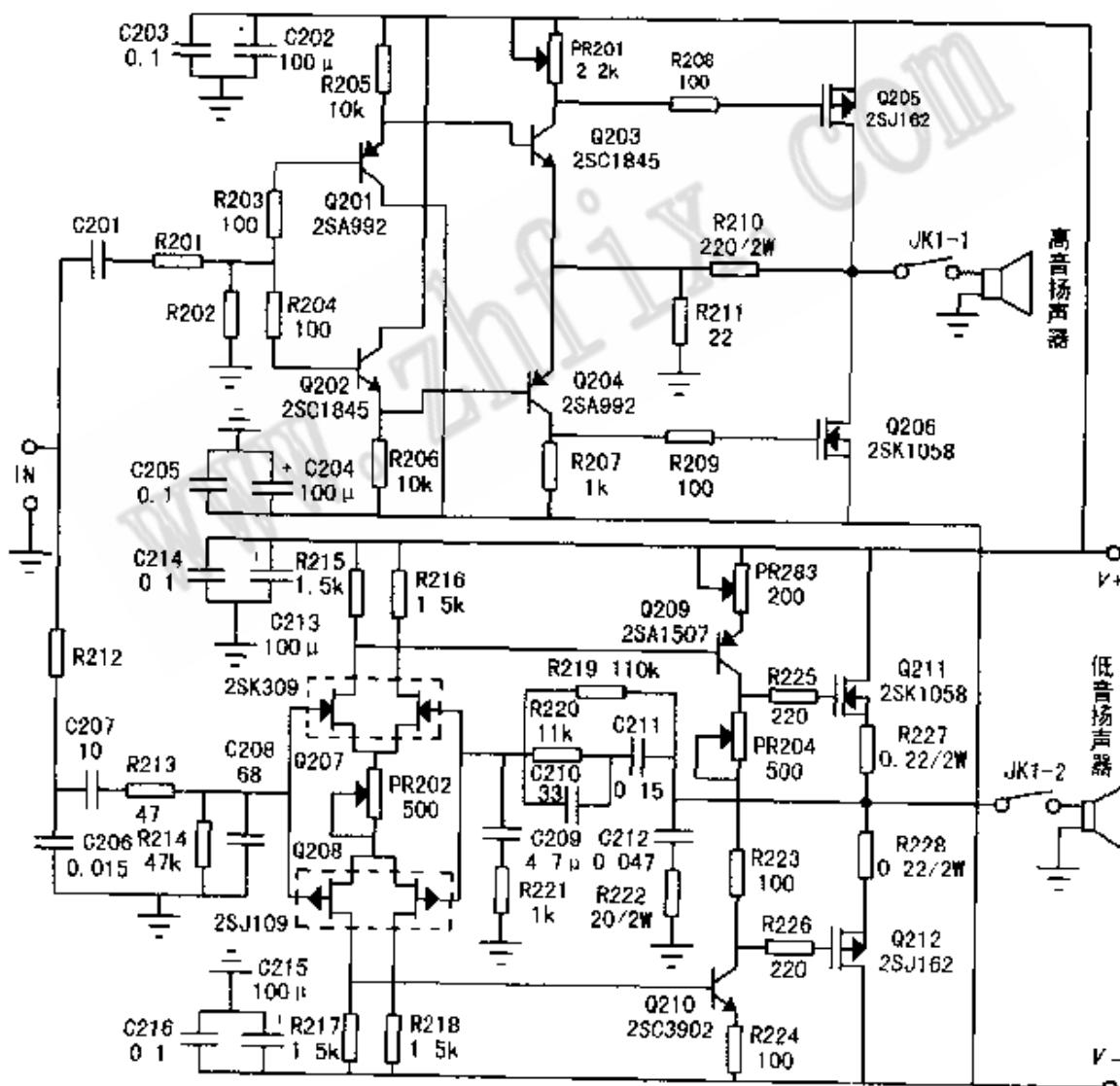


图 4-32 电子分频高保真功放后级放大电路

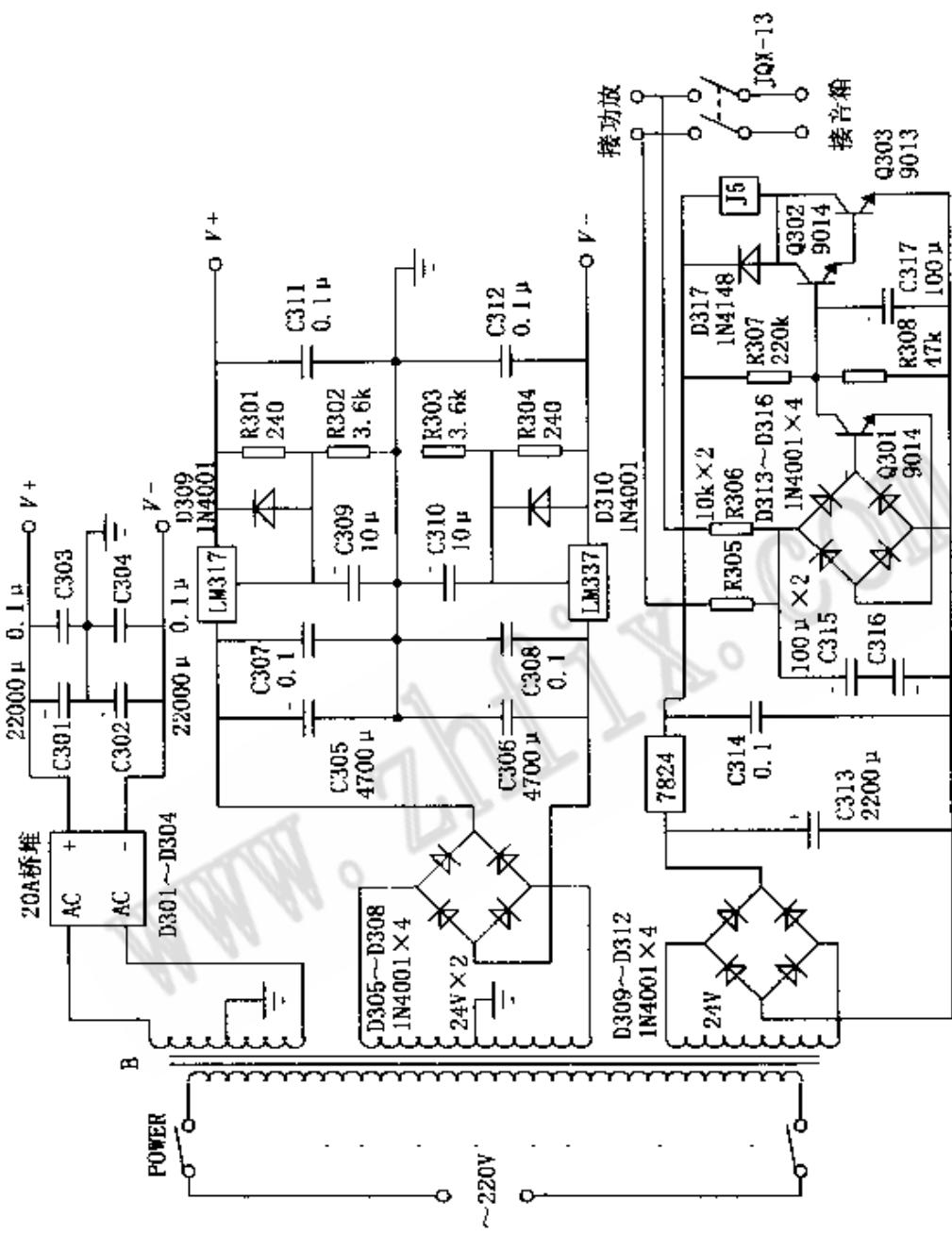


图 4--33 扬声器保护电路及电源电路

的原理较为常用，本文不再赘述。需要说明的是由于后级功放分为高低音两部分，所以用一个继电器是不可行的，可采用一套电路并联或串联两只继电器；或者制作两套相同的电路分别控制两个声道。本机采用了后者，它可抑制声道串音，并且出现问题时，容易判断是哪个声道出故障。

在此功放电路中，保护电路的电源都是使用后级放大部分的电源，但是一旦出现故障时，就可能影响到保护电路的稳定性，起不到应有的保护作用。因此建议给扬声器保护电路独立供电。

(二) 制作指导

图 4-34、图 4-35、图 4-36 为本机的各部分电路印刷电路图。元

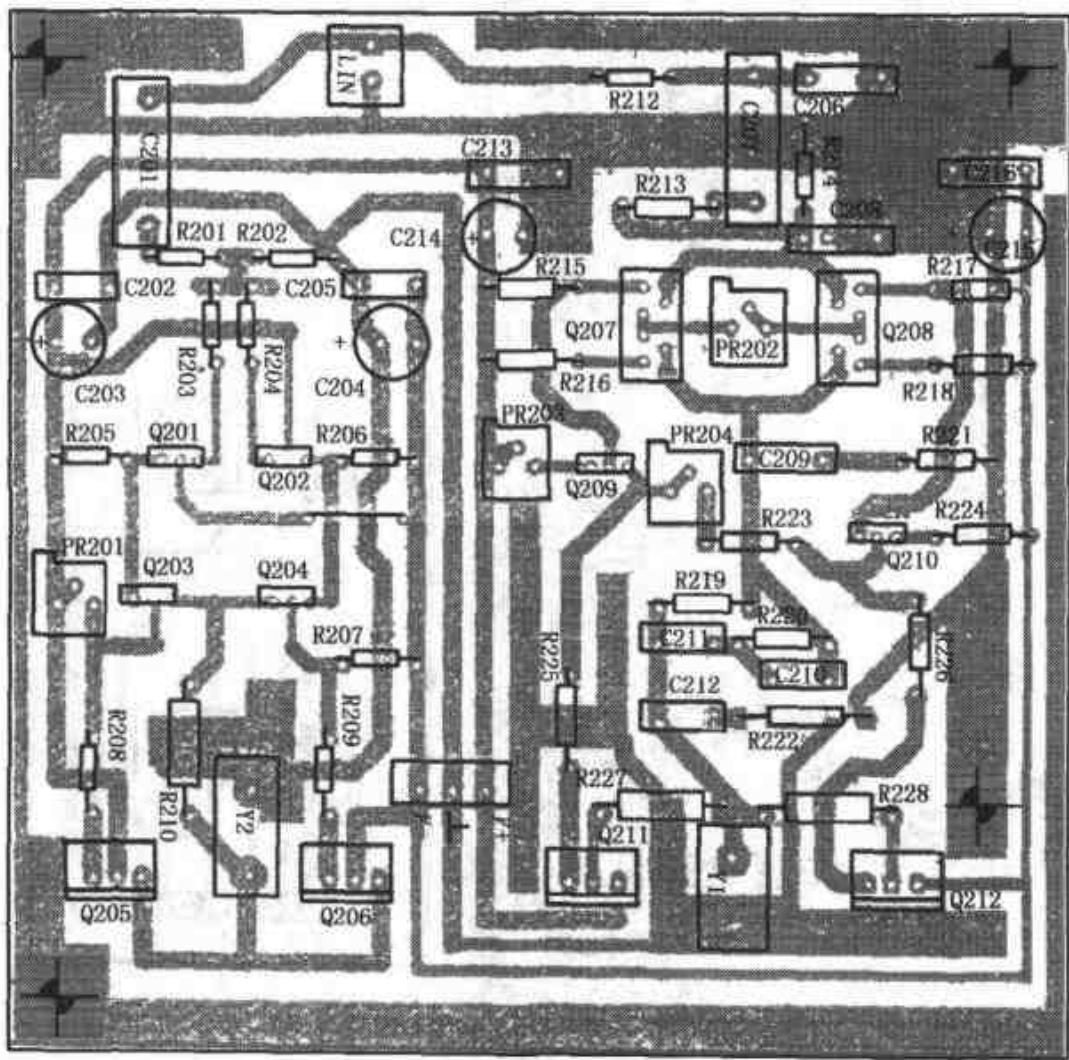


图 4-34 功率放大电路印刷电路图

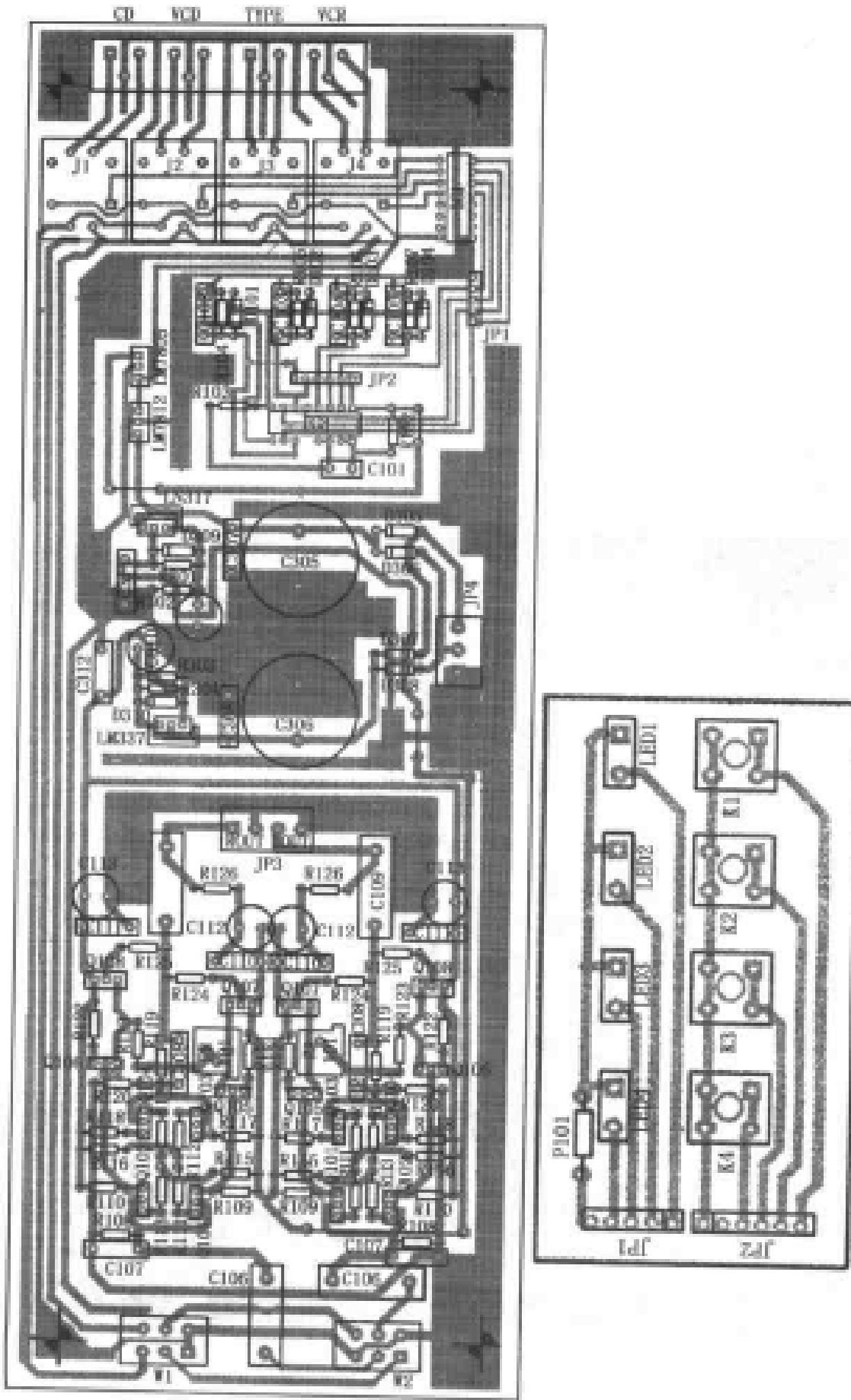


图 4-35 前级放大电路印制电路图

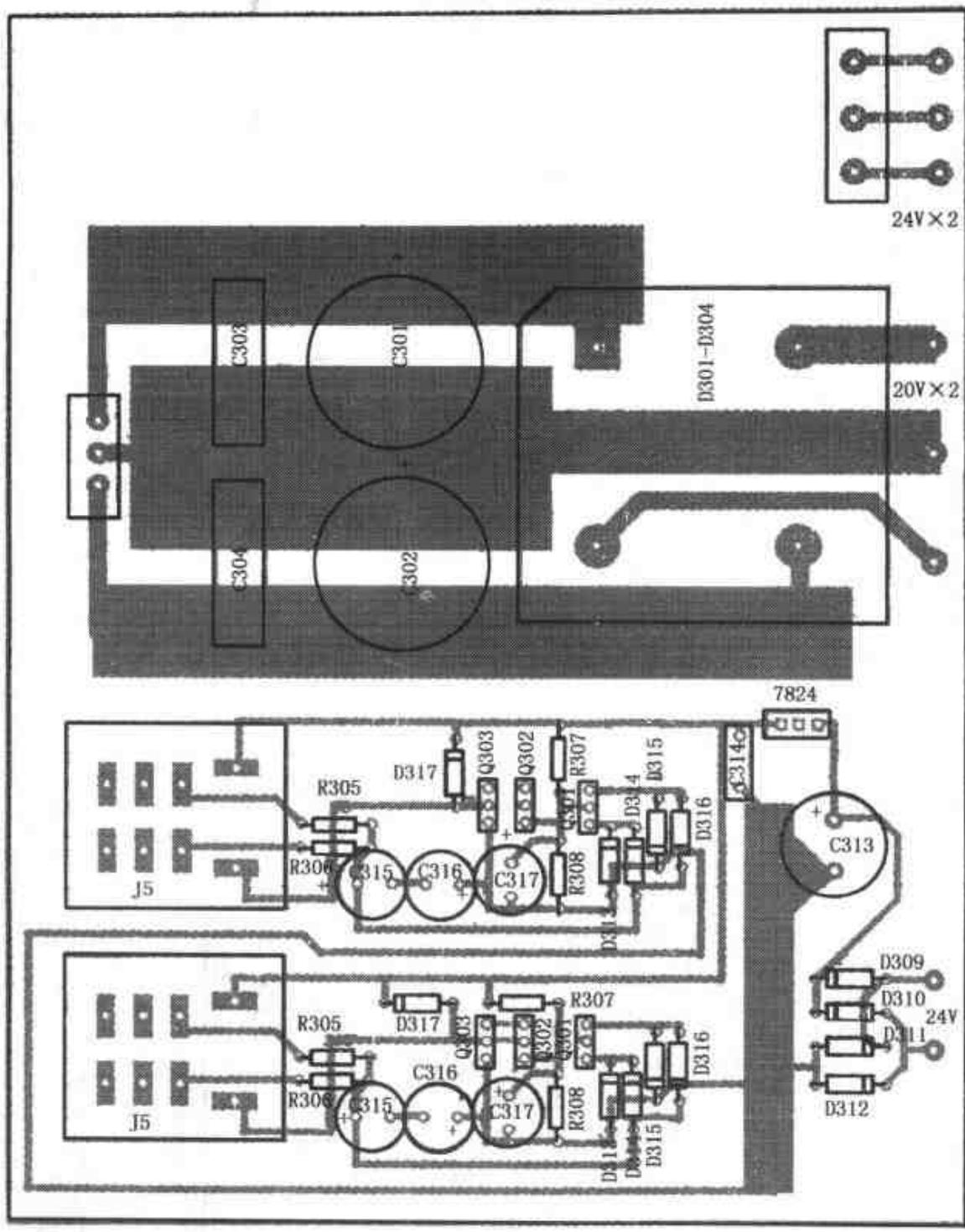


图 4-36 扬声器保护电路及电源电路印刷电路图

件的选择应该尽量采用优质正品元件，这样才能保证整机的性能与重放音质，需要注意的是不可只注重某一部分元件的质量而忽视另一部分，这样容易使重放音质变劣。对于功率管应该严格配对。

制作完成后对各元器件进行仔细检查，确认无误后，先将所有可调电阻调至中间位置，输入转换部分和保护部分只要元件质量保证，焊接无误，无需调整，即可正常工作。前级放大部分只需要调整 PR101，使 R124 两端电压为 0.2V 即可，当然前提是元件上下对称性好，否则 R124、R125 之间对地电压将不会是 0V，这时需要改变 R121 的阻值，直到为 0V 为止。

调整后级放大部分时，可改变 PR201 的阻值，使高音功放输出端的电压在 40mV 到 50mV 方可；再调整 PR203，使 PR204 两端电压为 0.9V；调整 PR204 的阻值，将 R227 两端的电压调整到 0.66V。这时第一轮调整结束，过几分钟再如上述调整一遍，如果电压稳定，就可投入使用。

十三、三声道 UL 超线性电子管功率放大器

(一) 电路特点

图 4-37 所示为三声道 UL 超线性电子管功率放大器（其中一个

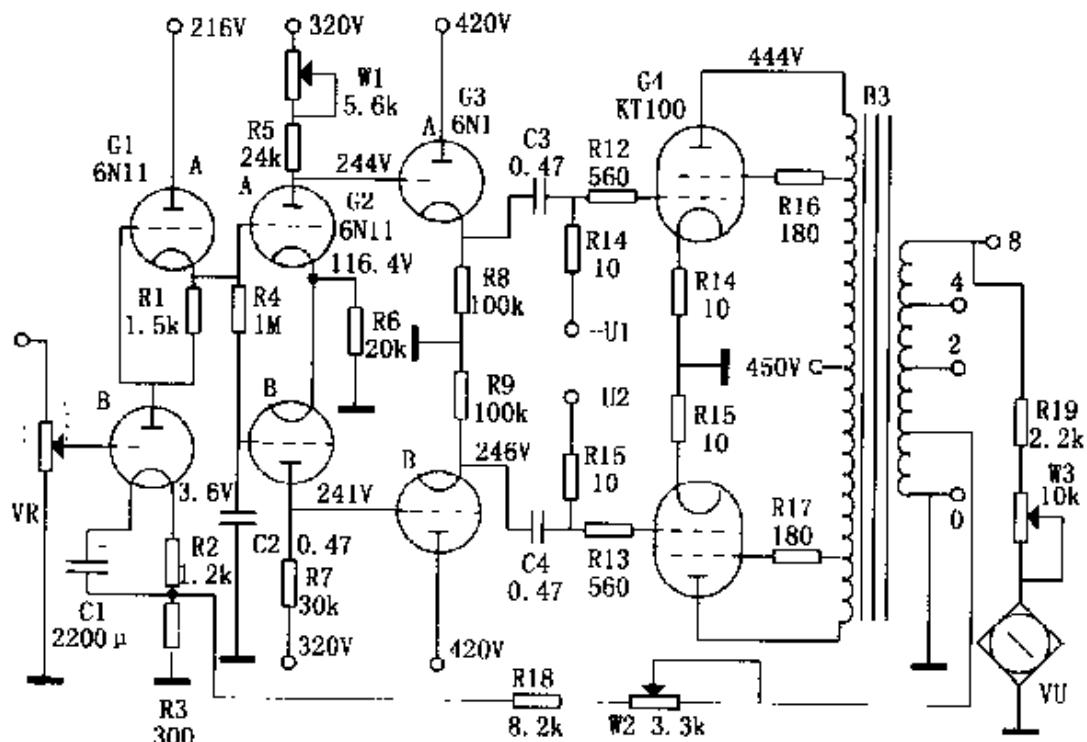


图 4-37 三声道 UL 超线性电子管功放一声道的电路图

声道)的电路图,各声道均由模式完全相同的4级放大电路组成,由前至后依次是前置、倒相、推动与功率级。图4-38为其电源电路,由高压与低压两个独立的电源部分组成。高压电源专供各个功率管的屏极,低压输出8组电源,主要支持功放的前级系统。

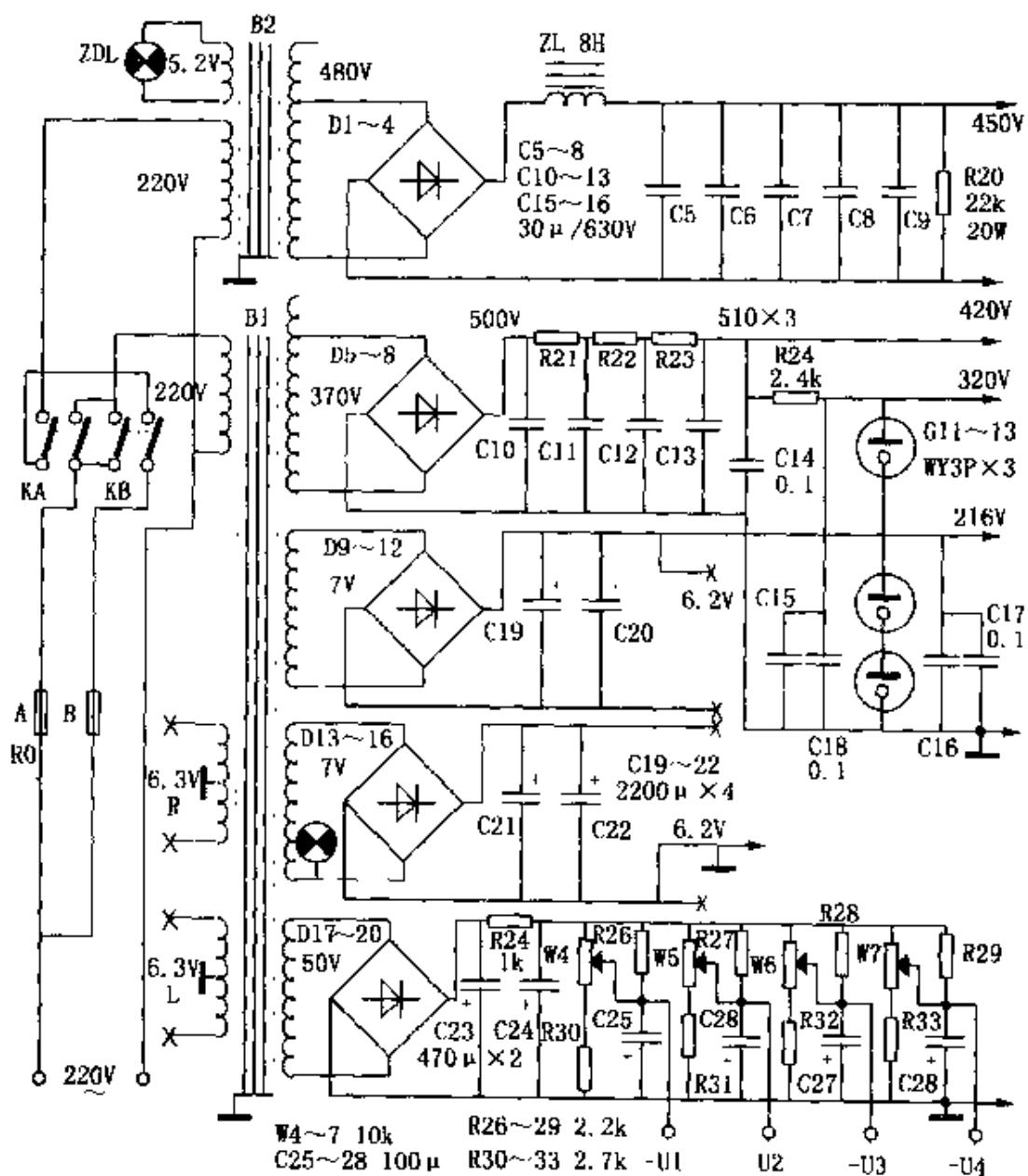


图4-38 三声道UL超线性电子管功放电源电路

1. 阴地栅地(SRPP)前置

此功放的前置放大电路很奇特,G1A、B两管对于直流DC为串

联电路，对于交流 AC 却是并联电路。由于 A 管的输入直接取自 B 管输出的反相信号，可见整个电路是一个直耦的自倒相推挽电路，并且是单端 A 类全波并联推挽电路。

本级类似于 OTL 电路，信号从电路的中点输出，电路中 R1、R2、R3 很重要。R2+R3 决定着整个电路的工作点与增益，R1 也直接左右着 G1A 的最佳偏置及全波输出的对称性。R2 上并联的旁路电容 C1 是前级电路中直接左右低端线性带宽的主要元件，C1 的容量达 $2200\mu\text{F}$ ，对低频的阻抗甚微，有效地保证了低频一直延伸到 0Hz。

2. 共阴极倒相器

本电路是利用两只电子管阴极互耦原理倒相的。受信号驱动，G2A 的屏流 I_o 及阴极电压 U_o 将随之变化，这也必然引起 G2B 的 I_p 发生变化。由于 A、B 两管 I_b 变化的方向相反（一个增大一个减小），因此两管输出电压相同，但相位却各异。

共阴极电路是一种性能非常高的直流差分倒相器。由于 G2A、B 的阴极互耦，存在着强烈的 DC 负反馈，共模抑制能力强，在宽带放大中显示出它有稳定性高、相移小的优势。共阴极电阻 R6 的阻值越大反馈作用越强，两臂输出电压也越平衡。

3. 阴极输出器

阴极输出器是此功放中最具代表性的电路。本级（G3A、B）虽无电压增益，却有以下特点：高输入，低输出阻抗；频带宽，失真极小；动态及瞬态响应好，有一定输出功率；抗干扰，高信噪比。

阴极输出器带负载能力好，能给出强劲而无削波的功率。即使末级工作在 AB2 类状态，本级也能轻松自如地推动。

4. 超线性 UL 功率级

从末级电路着眼，本级与传统的固定偏置 AB1 类功放电路没有什么两样，所不同的是功率管 G4、5 的帘栅极 g_2 改以往的常规接法，而是引到输出变压器 B3 两臂绕组特定的抽头上，使帘栅极 g_2

由静为动，在内发生反馈作用。此电路所给出的频响虽不完全是线性的，但却是超线性的。

5. 步进式音量控制器 VR

此功放采用的是步进式音量控制器 VR。与无级式电位器音量控制器相比，步进式 VR 控制器具有调节无噪声、衰减平衡、定位精确以及声道隔离度高等优点。它坐镇前沿信号入口，令各声道信号在不同的音量下始终都保持着非常对称。

6. 等响度控制器

与 VR 合二为一的等响度控制器又是一个新特色。等响度控制器的作用是随着功放输入信号（音量）的减弱，VR 电路中的 RC 网络将逐步加大对高低两端信号频率的提升，使小音量时的高低音更加突出。

7. 输出功率 VU 表

此功放各声道都装有 VU 表，除随时监视各声道的输出功率及工作情况外，对预防功放输出空载、过载、短路、自激振荡等引发的问题有着十分重要的意义。尤其是高电压、末级反馈不深的多声道大功率高保真电子管放大器，它们的输出变压器的绕组结构非常复杂，抗电强度一般也不太高。一旦在大信号时断开负载，输出变压器一次侧绕组所产生的自感电动势要比平时增高数十倍，极易击穿昂贵的输出变压器，VU 表在此的作用则更显得重要。

（二）元器件选择

1. 电子管

本机采用电子管 6N1、6N11、EL34、KT100、WY3P 都是享誉中外的名优电子管，共同的品质是高跨导 S、低内阻尼、响应线性宽等，它们的特性见 4.7 表所示。

2. 电容器

除负压及灯丝电源滤波外，整机一律采用 CBB 聚丙烯电容器。其中高、低压滤波为 CBB60 型 $30\mu\text{F}/630\text{V}$ 电容器（损耗角正切值

表 4-7 本机所用电子管特性

电子管型号	6N1	6N11	EL34	KT100
I_F (A)	0.6	0.34	1.5	1.6
U_P (V)	350	130	450	560
I_p (mA)	7.5	16	100	140
S (mA/V)	4.35	12.5	11	8.8
R_t (kΩ)	11.7	2.6	15	11
P_H (W)	2.2	2	25	42
I_k (mA)	25	22	150	230
P_{us} (W)			8	12

0.004%),此种电容器原为交流电网功率因素补偿及电动机移相、起动用。负压、灯丝滤波电容采用漏电极小的大型电解电容器。

3. 电阻器

除音量控制器 VR 外, 功放部分都选择大功率(3~5W)的金属膜电阻器 RJ。各电源滤波降压电阻都是关键元件, 采用的是大功率被釉线绕式电阻(Rx型)。功率管栅负压调整电阻选大型线绕式电位器, 此电位器上带有锁紧装置, 一经调整即可锁定阻值, 不因其他因素而引起失调问题。

4. 印刷电路板

印刷电路板选用介电高、耗损小的玻璃布高频板。此功率放大器印刷电路板的印刷电路是经过多次实物模拟后设计的, 板上的元件布置合理有序, 电路接点少, 出线短, 不搭桥, 不飞线。印刷电路板导线间距大, 分布电容小, 各级接地线呈 Y 状, 自成单元引向总接地点。由于设计周密, 一块三声道的前级印刷电路显得极为简洁明快, 如图 4-39 所示。

另外, 电源的 5 组全波整流器(20 只二极管)也合理地装配在

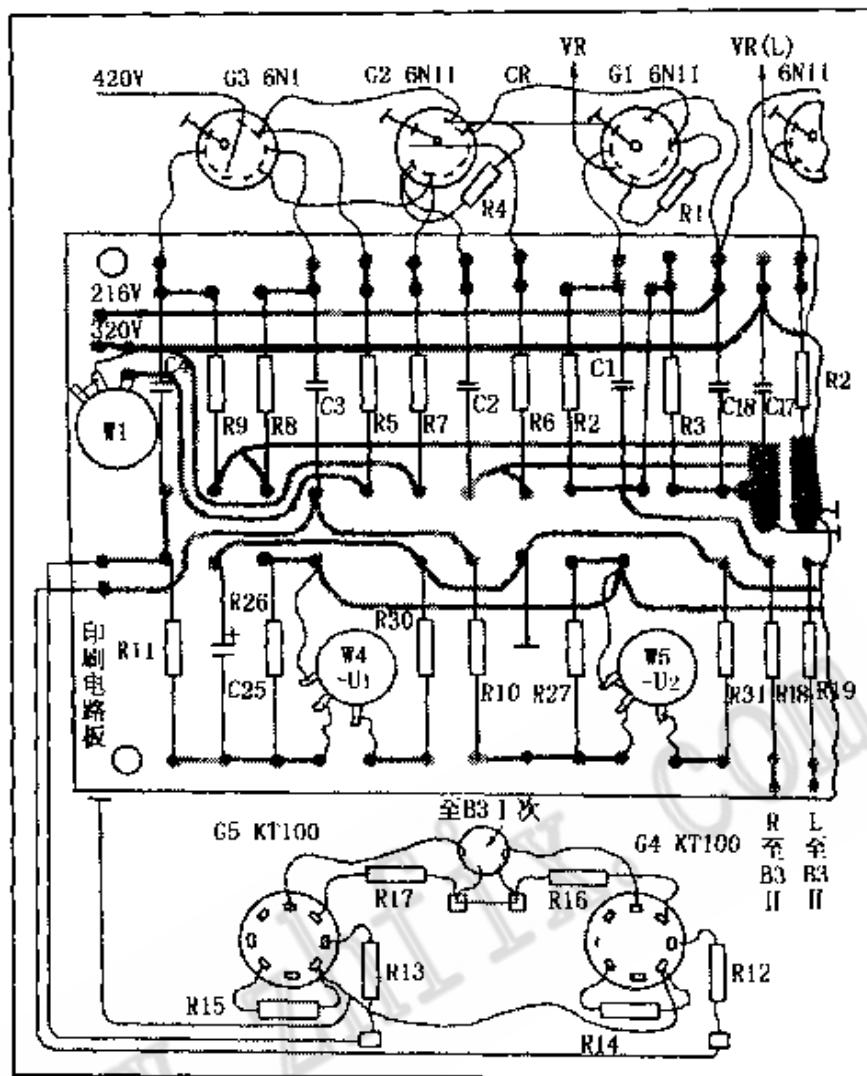


图 4-39 功放一个声道的印刷电路图

另一个电路板上，如图 4-40 所示，各电源地线单独输出，不存在公共的零地线汇流排问题。

5. 变压器

此功率放大器的高低压电源变压器 B1 和 B2、阻流圈 ZL 以及输出变压器 B3 和 B4 全部选用 D42-E1 型冷高磁通密度（1.6 万 TBM）优质铁心，并结合高强度漆包线精工绕成。

本机的高低压电源变压器 B1 和 B2 的功率及 N/V 设计得较保守，绕制时又在一次侧和二次侧绕组 N 间插入多重屏蔽。两种变压器共同的优点是体积小、功率大、励磁及干扰都非常小，其结构如图 4-41 所示。其中阻流圈 ZL 的参数是 $L=8H$ 、 $I=0.8A$ 、 $R=17\Omega$ 。

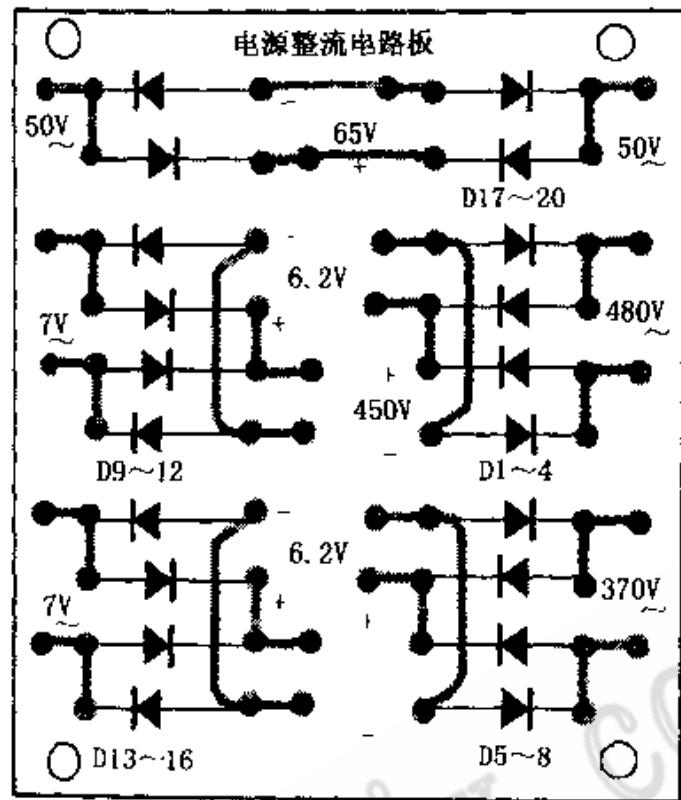


图 4-40 功放整流电路印刷电路图
低压电源变压器B1

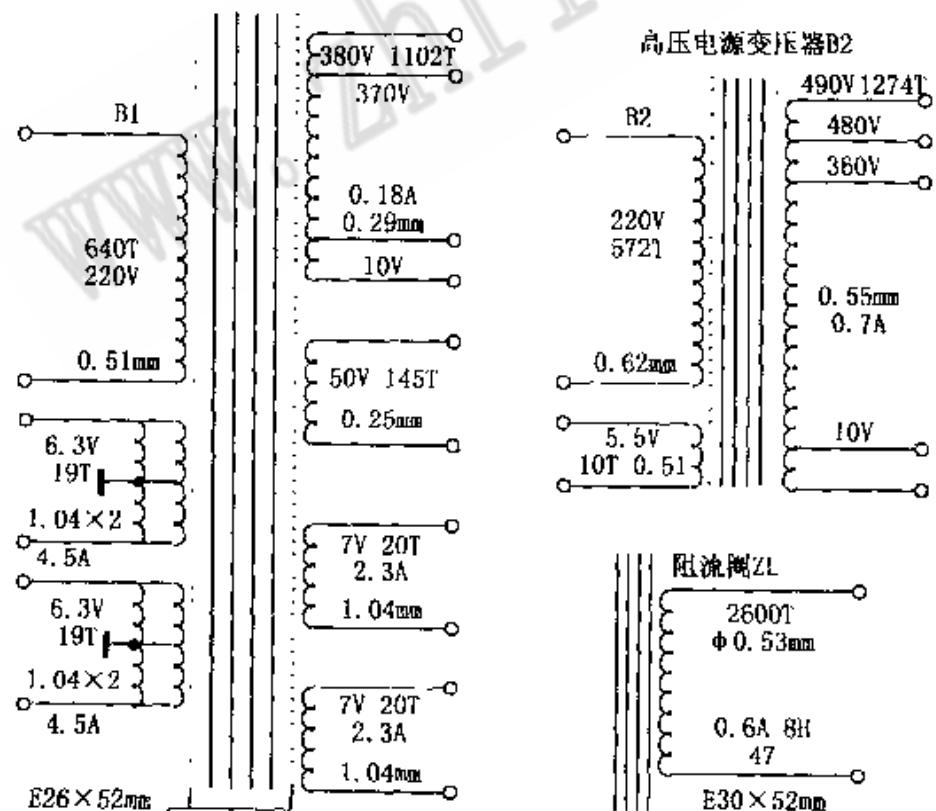


图 4-41 高低压电源变压器线圈结构

本机的输出变压器采取了极其烦琐的分组、分段、分层、正反向绕制技术和蜂房、间绕措施，如图 4-42 所示。

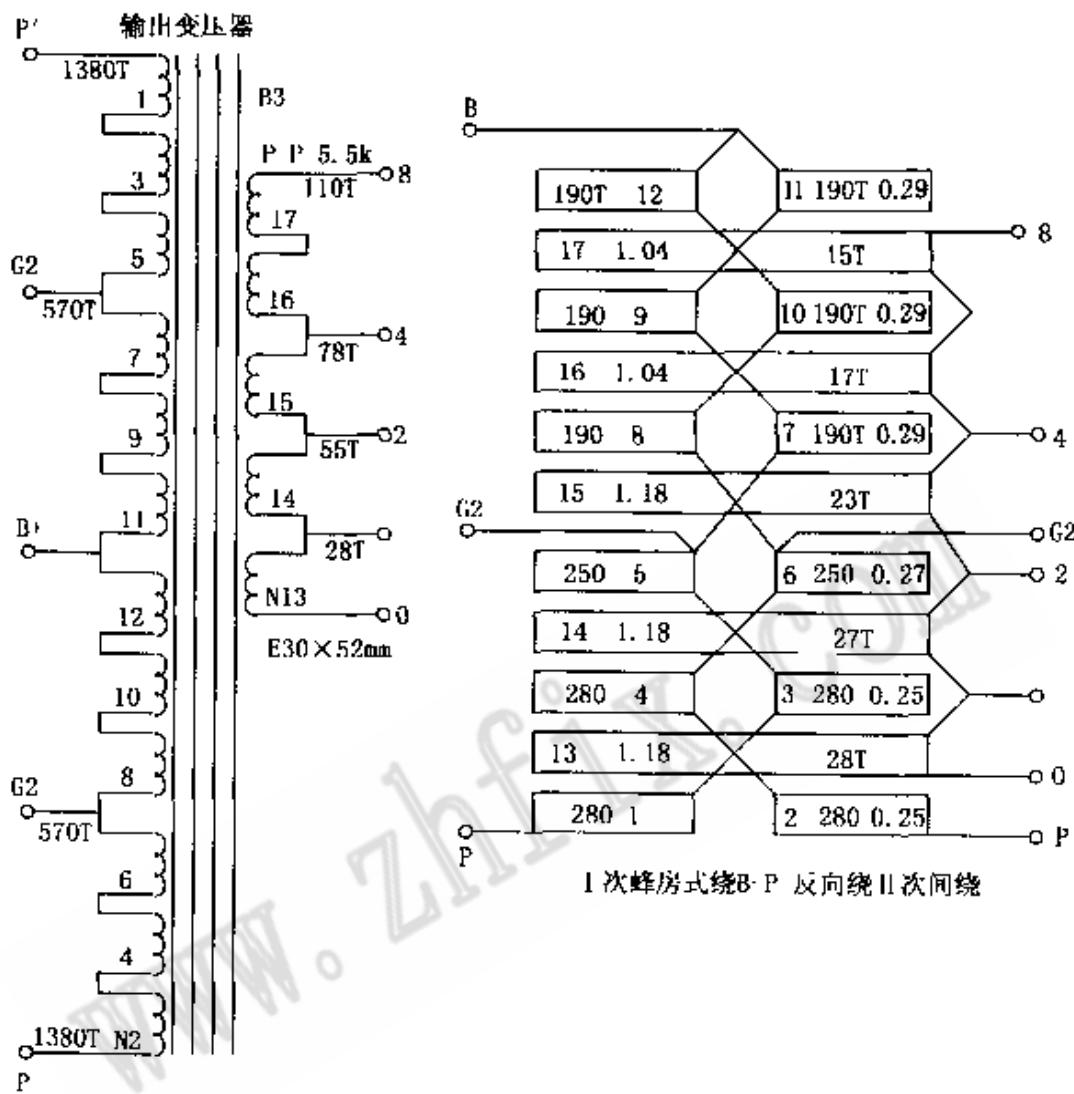


图 4-42 输出变压器的绕组结构

(三) 制作指导

1. 电路装配特点

本机采取的是单元装配工艺。整机的前后级及电源系统各为单元，并以三分天下的格局装配在机箱里，如图 4-43 所示。右侧是电源系统，里面有序地安装着 B1、B2、ZL、整流滤波 等所有 AC 元件。

整流组件就近附设在 B2 的端子板上，各类交流电源在此直接

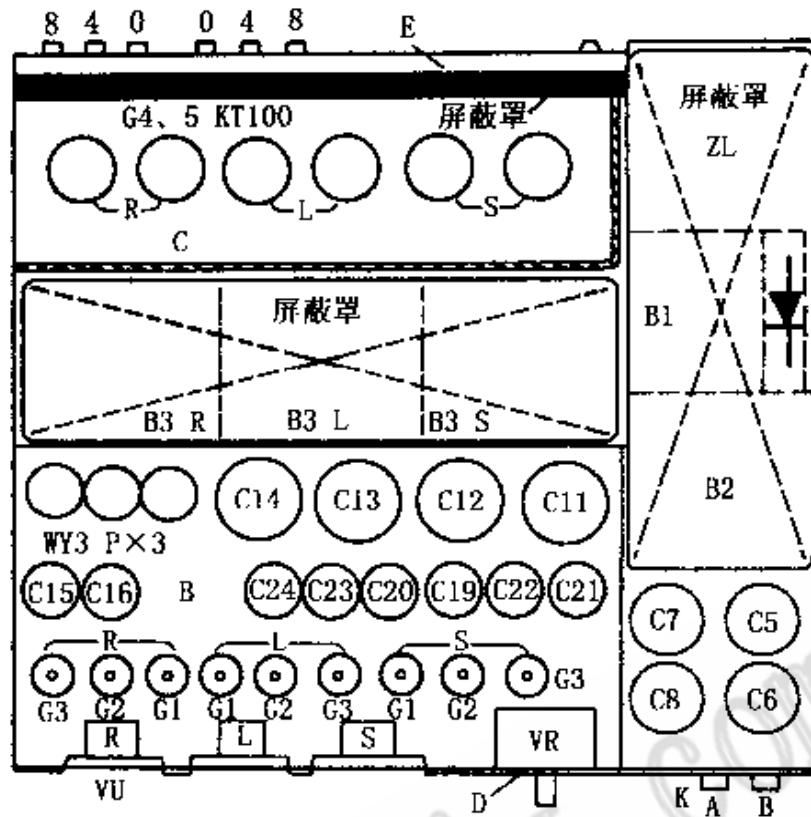


图 1-13 整机内部分布

整流，并以全直流的形式向前后级供电，使机内电场分布更加纯洁，没有交扰成分。本单元的所有元件、导线被一个高导磁的软铁罩严密屏蔽，各种杂散磁场几乎没有外泄的可能，这是本机能取得高信噪比的主要原因。

本机的 16 只大型滤波电容器 ($\phi 50\text{mm} \pm 90\text{mm}$) 都用金属件牢固地安装在底板上，各自与相关电路处于最接近、散热最佳的位置上。

左侧前部是前级单元，底板上下分别安装着前级系统的所有电子管和电路板。前级之所以采用印刷电路板装配元件，主要是因为支架装配（搭棚装配）存在着以下的问题：一是元件组装难度大，工艺排列不整洁；二是电路引线多而长，分布电容 C_{d} 、分布电感 L_{d} 大，电路不稳定；三是接地不好处理，可靠性差，检修不易。相反，精

心设计的印刷电路板就没有上述问题。由于本机系 DC 前级，电路板上仅有一些电阻和几只电容器，引至管脚及周边的导线比较少。底盘内不但简洁明快，更主要的是电路的分布电容 C_d 和分布电感 L_d 特别小。另一个特点是本机的所有印刷电路板都采用了元件正面焊接工艺，元件与印刷电路一目了然，极大地方便了检修与测试。

后级单元最为简单，只有输出变压器 B3、B4 和功率管。后级的 12 只防振电阻都直接借用空管脚支持就近连接电路，此举也是从最佳的防振效果上着眼的。B3、B4 也被严格屏蔽，杜绝了两者之间以及它们对功率管的交扰调制，有效地提高了 R、L 声道的隔离度。

2. 布线与接地技术

消除电路谐振、减小分布电容以及分布电感 L 始终是 Hi-Fi 功放机必须面对的最为棘手的问题。在各种放大器中，由于元件自身及元件与元件、导线、构件、底盘之间都存在着分布电容和分布电感问题，它们共同潜藏在电路中，引起电路谐振与相移，电路阻抗变得极为复杂，以种种花样损害着音质。那些频率特性曲线高凹不平、带宽线性狭窄、响应迟钝正是它们导演的结果。因此，一切能减小 C_d 及 L_d 的措施对赢得声音的 Hi-Fi 重放都是十分可贵的。

为获得理想的波形和高保真度，本机对它的每个元件的位置、管脚的引向、每根导线的走向、长度及电流密度以及它们与每个细微电子框架的因果关系都是严格依据电路特性、电路次序反复权衡与周密设计的，如图 4-44 所示。

本机对信号以外的电路布线采取的是最传统、最正规的线扎装配技术。它是依据机内元件分布、电流属性（AC、DC）、导线走向、出线次序等，用事先模拟捆扎成型的线扎总成，沿底盘周边角落牢固地敷设，并有序地连接各个负载与既定的接地点。

B1 和 B2 的静电屏蔽及两组 AC 灯丝绕组中心抽头，因它们与电路不存在回路关系，将两者就近直接接地，以防过长的引线干扰其他电路。高低压、DC 灯丝、负电源等电源与它们的负载自成单元，

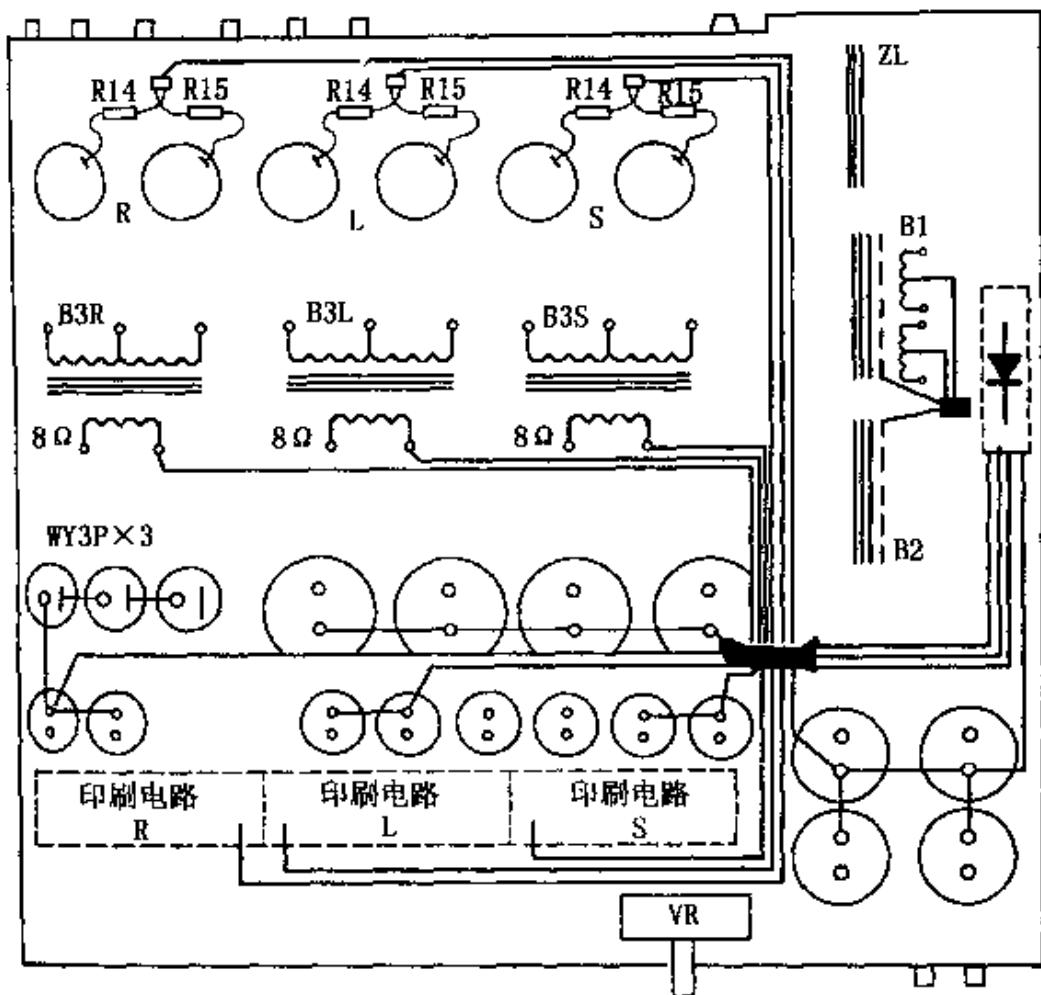


图 4-14 功放各级电路的接地方式

各自的地线彼此绝缘，最后交汇在前级一点接地。各声道、各电路、级与级的地线彼此独立，在前级一点接地。

本机不但一丝不苟地实施了 Y（星型）一点接地，还采取了高电流密度导线连接主要电路与接地，真正做到底板无杂散电流。Y 型一点接地，各电路不存在公共地线，回路电流走向更加合理有序，彻底清除了各种谐振与交扰自激。高 I 密度及无屏蔽导线的实施对电路阻抗、 C_o 、 L_o 以及回复时间特性等品质因素的提高也是不言而喻的，它们共同开创了本机 Hi-Fi 的广阔天地。

3. 机械组装特点

本机设计成超薄型箱式结构，由 5 块单元底盘组合而成，各单

元用 3mm 厚的铝合金板冲压成型。电源系统 A 装配在 U 形底盘的凹槽内，目的是降低整机高度并与屏蔽罩子互为一体。前级单元 B 是常规的 II 型底盘，盘下较大的空间装配导线与电路板。一高一低的异形底盘是末级单元 C，目的是尽量降低输出变压器 B3、B4 及功率管的高度并与整机高度统一。另外两个单元是前后面板 (D、E)，上面分别装配着所有端子、VU 表和控制元件。

4. 散热

为解决散热问题，本机采用以下措施。

(1) 设置独立的高低压电源系统并增大 B1、B2、B3、B4、ZL 的储备功率。各类电源全部用高效低耗的晶体二极管整流，采用冷阴极电子管稳压，它们的正常功耗仅为 2~3W。

(2) 调整功率电子管的位置，让热量直接辐射机外。

(3) 在各电源变压器、功率管周边设置多重隔热、导热装置，阻止热量辐射机内。

(4) 在底盘、机壳、屏蔽罩等相应位置设置通风孔，提高空气热对流能力。

(5) 采用导热系数高的铝底盘，底盘各处温度均匀，热辐射面积大，散热性能好。

(四) 整机调试

1. 静态电路调整

(1) 灯丝电源调整。功率管的交流灯丝电压 U_{FAC} 应为 61~63V，前级直流灯丝电压 U_{FDc} 应在 6~6.3V 之间。各声道共用一套灯丝电源，其中功率管灯丝负荷相当重，电流达 9A 以上。当从管脚上测得灯丝电压 U_F 明显低于输出端时，说明灯丝回路导线电流不够，内阻偏高、电压降太大。如：导线内阻为 0.1Ω 时压降将达 1V 左右，这无疑会损害功放的效能，应采取分路传输或选择电流大的导线。

两组 DC 灯丝电源有载时的电压为 61V，空载电压约为 10V 左右。如果发现有载时 U_F 偏高，可在电路中串一电阻降低。适当降低

前置第一级的 U_F 有利于改善信噪比，但最低不得小于 5.6V。

(2) 高、低压电源调整。稳压管 WY3P 的输入电压约为稳定电压的 1.3~1.5 倍，稳压性能的调整主要是选择合适的限流电阻 R_L (R_{24})， R_L 大小由以下公式确定：

$$R_L = (U_A - U_{\phi}) / I$$

R_L 大些稳压性能好，但输入电压稍低时管子易熄辉或引起辉光振荡。当 WY3P 的 U_0 (420V) 变化在 10% 的范围内时，管内电流在 6~40mA 为正常。电流过小管子将熄辉，过大则进入反常辉光区而烧坏管子。调整时暂用 $\sim 3k\Omega/5W$ 可调电阻代替 R_{24} ，mA 表串接在管子阴极与地之间，将 B2 的输入市电调升到 235V，调整 R_{24} 使管内电流为 40mA，再将市电降低到 190V，如果管子不熄辉（电流为 7mA），就调整好了。如果市电低到 185V 仍不熄辉，可将市电升为 240V 再调，如此反复，使 220V 市电波动在 $\pm 20\%$ 间都能有很好的稳压性能。

电子管 KT100 功率管的屏压 U_0 定为 450V，EL34 为 430V。由于 F 型滤波器的平均输出电压比较低，约为 AC 电压的 0.95 倍。DC 高压在 450V 时整流器的 AC 输入电压为 475V，DC 空载电压达 675V，要注意滤波电容器的耐压值。

提高 U_P ，可增加功放输出功率。由于 UL 功放的 U_P 与帘栅极电压 U_{g2} 相同，功放中两种型号的功率管的 U_{g2} 已接近极限值，对于国产 KT100 不得过分提高 U_P 使用，否则 U_{g2} 损耗严重超标，将会引起功放管产生自激振荡、信噪比变劣、可靠性下降等问题。

(3) 偏置电压调整。前级电路、电源正常时，各管的静态偏置负电压 $-U$ 在 3~6V 可视为正常。电子管都工作在负偏置状态（即 U_g 比 U_k 低），栅 $-U$ 低管子的 I_P 高，栅 $-U$ 高情况则相反，这是所有电子管的共性。在多级 DC 电路中不论管子的栅极 U_g 多高，只要它比阴极电压 U_k 低，管子就不会进入饱和状态。

本机的 G1、G2、G3 的栅压分别是 3.6V、4.8V、5V，它们是

靠 3 组不同的电源 (420V、320V、216V) 支持着。测量时, G1 的 U_k 和 G2/G3 的 U_k 与 U_g 间的电位差则是它们各自的偏置电压。如果存在较大出入, 则主要是前一级电子管特性上的问题。

SRPP 电路与 DC 呈串联关系, 当 G1A、B 管的内阻以及电路对称时 ($R_1+R_2=R_3$), B 点上下电压 (与电源地之间) 也肯定为电源电压的 1/2 (108V)。A、B 管的偏置电阻相等时, 上下管的偏置电压也肯定相等 (各为 3.6V)。如果屏压、栅负压不平衡, 主要是 A 管 R_b 及各自的偏置电阻不相等的原因。上述两个平衡很重要, 它们直接影响到 SRPP 自倒相推挽输出信号的对称性。

A 点的电压为 111.6V ($108 + 3.6V = 111.6V$)。此电压是多级 DC 电路工作点的基准, 它直接关系到后两级电子管工作点的高低。A 点电压高, 后两级工作点便低, 反之则高。

功率管未加 U_p 前, 先将各管栅负压 (工作点) 粗调在 50V 左右, 以防 $-U_g$ 过低导致 I_p 过高引起高压电源发生事故。KT100 的 U_p 在 450V 时静态瓦为 0.06A。为使测调安全可将电压表并联在 R14、R15 (取样电阻) 上测量, 当电压表指示在 0.6V 时, 电流则为 0.06A (60mA), 待功放使用一段时间后再逐一精调几次后将 R_w 锁定。

(4) 超线性 UL 电路自激的问题。UL 电路不当极易引发振荡自激, 而且是频率很高的超高频自激。自激时功放输出电压很高, 人耳却丝毫听不到, 严重时将无声无息地烧毁扬声器, 击穿输出变压器。

UL 自激很容易理解, 因为超线性本身就是一个特殊的反馈电路, 它的屏极与帘栅极间存在着强烈的反馈作用, 对输出变压器的相移、对外电路的反馈深度极为敏感。UL 功放管帘栅极的交流电位很高, 对屏压高低、布线不当也很敏感, 当电路稍有刺激极易引发自身的自激。自激是大功率 UL 功放的一个特殊而普遍的问题, 它关系到功放的优劣成败, 对它的处理也非常棘手。调试前如发现末级存在自激, 可参考以下几方面排除。

(1) 在绕组相序正确的情况下，交换输出变压器一次侧、二次侧绕组的串并联接法。对调一次侧至功率管屏极、帘栅极端子引线或二次侧冷热端子引线，找出输出变压器绕组的最小相移接法。

(2) 在失真度达标时，不必追求大环路深反馈，反馈级数不宜超过4级电路，深度控制在-12dB以内。

(3) 降低屏极电压应用，必要时在B3的P-P接一只3300pF高压小电容，或在A点对地并联一只10~30pF电容器试之。

(4) 改善末级电路布线，各防振电阻R12、R14、R16紧靠管脚焊接。

(5) 加强输出变压器至屏极、帘栅极导线的屏蔽。

2. 动态调整

(1) 信号对称性调整。倒相器的平衡与否对失真度的影响最大。简单的调整方法是由前级输入一定强度为1kHz音频信号，调整RW1使G2AB上臂在大小信号时输出信号电压相等。

由推动级6N1阴极和功率管屏板上分别测量两臂输出信号电压，当电子管特性严格对称时，这两级输出的信号也应当对称平衡。如果发现某一级上下臂振幅存在差异，就应更换特性一致的双三极电子管。

(2) 工作点测试。在A类电压放大中电子管的工作点都选择在栅极特性曲线直线条段的中点，工作点如选择合适（即最佳偏置电压），有信号时管子的 I_P 和 U_K 应固定不变。调整时用电压表逐级测量阴极电阻 R_K 上的电压，增大或减小输入信号，电表指示不应发生变化。如果指示偏高，就说明工作点偏低，偏置电压过大，应减小 R_K 值；如果指示偏低，就说明工作点偏高，偏置电压太小，应增大 R_K 值。

工作点的准确与否直接影响到大信号的失真度，由于DC电路各级工作点互相牵连，精确调整好某一级工作点相当麻烦。有时仅靠增减 R_K 往往会影响后一级的工作点，需结合增减屏极电源电压

方可奏效。本机各级工作点一般都不会有大的出入。

(3) 额定输出功率、VU 表调测。将假负载电阻 R ($8\Omega/100W$)、电压表、失真度仪并联在功放输出端，由前级输入 $1kHz$ 、 $1.2V$ 音频信号，调整功放 VR 使输出功率上升 (VR 暂用电位器代替)，在不同输出电压下反复测量失真度，当在较高输出功率时测得失真度为 2% ，假负载 R 上的电压便是额定输出功率 P_w 。如果输出电压为 $20V$ ，则额定功率为：

$$P_w = U^2/Z = 20^2/8 = 50W$$

在额定输出功率下调整 $RW3$ ，使 VU 表的表针指示到 0 刻度，VU 表即校准了。如果发现 R 、 S 、 L 声道输出功率存在着差异，可微调 ($RW3$) 其中一个或两个声道的反馈量，使 3 个声道输出电压相等为止 (R 、 L 、 S 声道同时输入信号)。

(五) 注意问题

由于 DC 及 UL 电路有别于普通电路，测试中需注意以下问题。

(1) 用 AC 调压器将输入市电调整到 $220V \pm 3\%$ 以内，以保证调测的准确性。

(2) 初次启动高压、次高压时，应将输入市电由低缓升到额定值，以防电路元件有问题而引起事故。

(3) 在测试一些与高压、次高压无关的项目时可将这些高电源分别关闭，以利安全且可长时间调试。

(4) 轻载时 DC 灯丝电压上升很高，故不得随意拔掉前级任一电子管，以防 U_F 上升或 U_K 增高引起下一级工作点反偏 (正偏置) 而烧坏电子管，也不得断开功率管 U_P ，以防帘栅极电流增高损坏功率管。

(5) 功放内各电路、元件、导线、焊点上都带有高电压，测试调整中需格外小心谨慎，以防发生人身触电事故。

十四、数码卡拉OK混响器

(一) 电路特点

图 4-45 为数码卡拉OK 电路原理图。它由两路话筒放大、音调音量控制、声音激励、声音混合与滤波、数码混响延时以及声音与音乐混合放大等电路组成。电路中 IC1NE5532 完成 MIC1 和 MIC2 放大的任务，放大倍数分别由 IC1 的 ② 脚和 ③、⑦ 脚的 R3、R4 调整。放大后信号分别由 C9、C10 送入电位器式电子控制器 IC2 TA7630 中，两路声音信号进行音调、音量控制处理。该 IC 是日本东芝公司产品，具有双声道直流控制音量、音调及平衡功能，音量控制范围达 80dB，音调控制范围士 15dB，温度漂移小，工作稳定，交叉串音小，噪声低等特点。

W2、W3 分别为高、低音调节电位器，W1 为音量调节电位器。经高低音处理后 MIC 信号由 C24、C26 耦合送入具有双声道结构的 SA601ET 模块电路中进行声音激励处理（SA601EF 为广东股峰电器公司生产的产品），让每路话筒信号各占 SA601ET 的一个声道，可以各自调节声音的激励量或提升低频，互不干涉，方便不同风格的演唱者同时演唱。

W5 和 W6 用来调节声音的激励量，W4、W7 用来提升低音，激励后的信号在 IC4a 反相混合，最后由 IC4b 组成的三阶低通滤波器滤掉高频部分，截止频率为 7kHz。如果不采用滤波电路，当激励量调得较大时，有较明显的高频噪声输出，卡拉OK 机就容易自激，而 7kHz 的截止频率范围较宽，充分保证了人声高频和高次谐波的通过量。

经滤波器滤波后的声音信号和高次谐波信号由 C38 耦合到 IC5 M65831P 作混响延时处理。W8 用来调节混响次数。M65831P 是日本三菱公司推出的 M65 系列单片数码 OK 集成电路，其失真度为 0.3%，信噪比为 92dB，延时时间为 12.5~196.6ms，分 16 挡可

调，既可作卡拉OK电路，也可作环绕声处理电路。电路中不同的延时时间由IC4的4、5、3、1脚高低电平编程控制。

本卡拉OK电路可用4只二极管组成四个或门电路，通过一只 1×4 开关K就能方便设定四挡延时时间，经数码延时混响处理后的信号与MIC直通信号分别由C54、C37耦合到IC6混合放大，组成模拟立体声信号输出。立体声伴奏音乐信号分别由C55、C56输入到IC6，与MIC信号混合放大后由R47、R48输出，W9用来调节伴奏音乐信号与混音后的MIC信号。

本机的电源为 $\pm 12V$ 、 $\pm 5V$ ，用三只三端稳压集成块7812、7912、7805组成。

(二) 制作指导

图4-16为本卡拉OK混响器印刷电路图。为了保证本卡拉OK电路高品质高性能，建议所用集成电路按图标型号选正品，不过三端稳压块7812、7912可选比较便宜的正品。容量小于 $5\mu F$ 的电容最好选用金属化聚丙烯薄膜的CBB型、CL型也可，电解电容尽量择优选择。

本电路所用元件较多，焊接前最好先将各元件检测一下再焊接，焊接完毕，要反复检查，确认无误后，方可通电试听，一般元件质量可靠而焊接无误，无需再作其他任何调试，即能投入使用。